Für die Vollständigkeit und Richtigkeit der einzelnen Inhalte der Vorlesung 61-020 „Einführung in die Pflanzenphysiologie“ kann keine Gewähr übernommen werden.

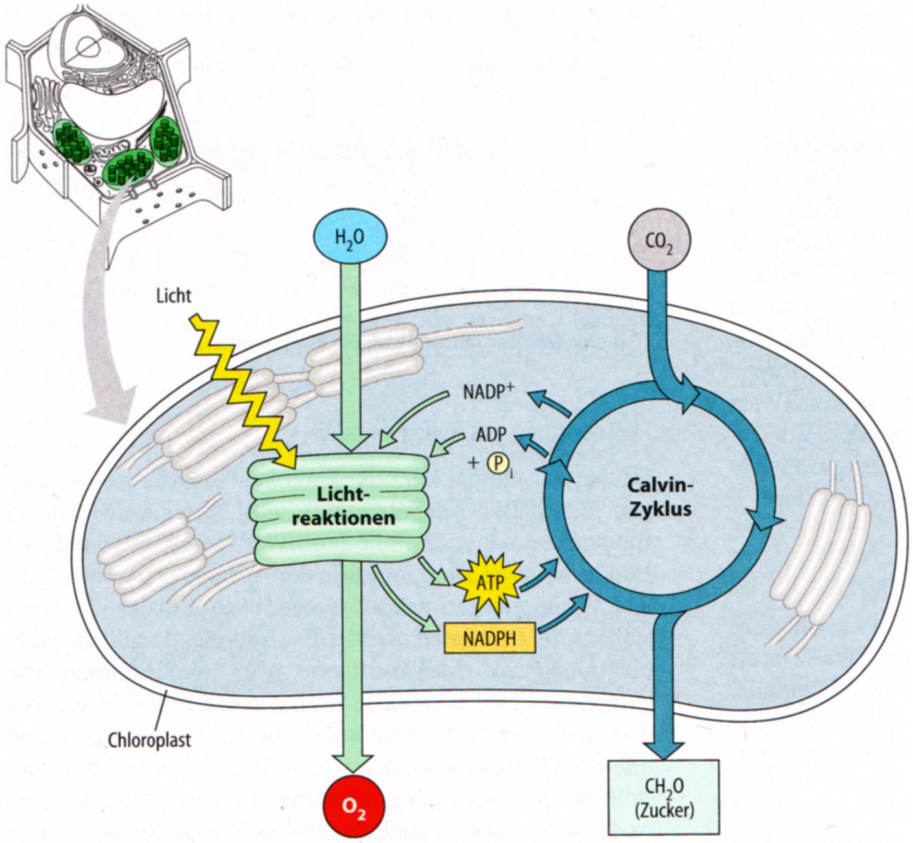
Es ist nicht gestattet, diese Vorlesung oder Teile dieser Vorlesung ohne ausdrückliche Genehmigung der Dozentinnen und Dozenten für die Wiedergabe im Druck, Vorträge oder eine andere Art der Veröffentlichung, auch nicht im Internet, zu verwenden. Für Teile der Abbildungen liegen die Rechte bei Buchverlagen, wissenschaftlichen Zeitschriften oder bei den Dozentinnen und Dozenten dieser Veranstaltung.

Hamburg, 21.11. 2022 Prof. Stefan Hoth

Geplanter Ablauf der Vorlesung

17. Oktober 2022	Wasserhaushalt
24. Oktober 2022	Mineralstoffernährung
7. November 2022	Mineralstoffernährung/ Bodenkunde
14. November 2022	Photosynthese
21. November 2022	Photosynthese
28. November 2022	Photosynthese
5. Dezember 2022	Photosynthese
12. Dezember 2022	Photosynthese
19. Dezember 2022	Pflanzenhormone
9. Januar 2023	Pflanzenhormone
16. Januar 2023	Pflanzenhormone
23. Januar 2023	Photosynthese/ Licht als Entwicklungsstimulus
30. Januar 2023	Licht als Entwicklungsstimulus

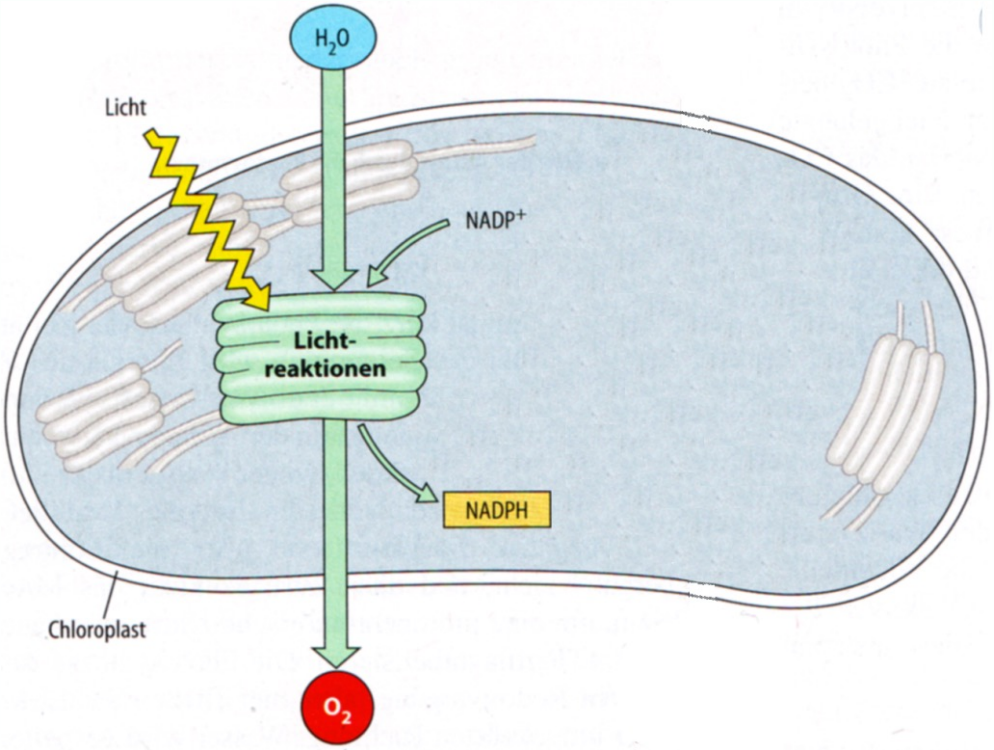
Licht und Dunkel



$$6\ CO_2 + 6\ H_2O$$

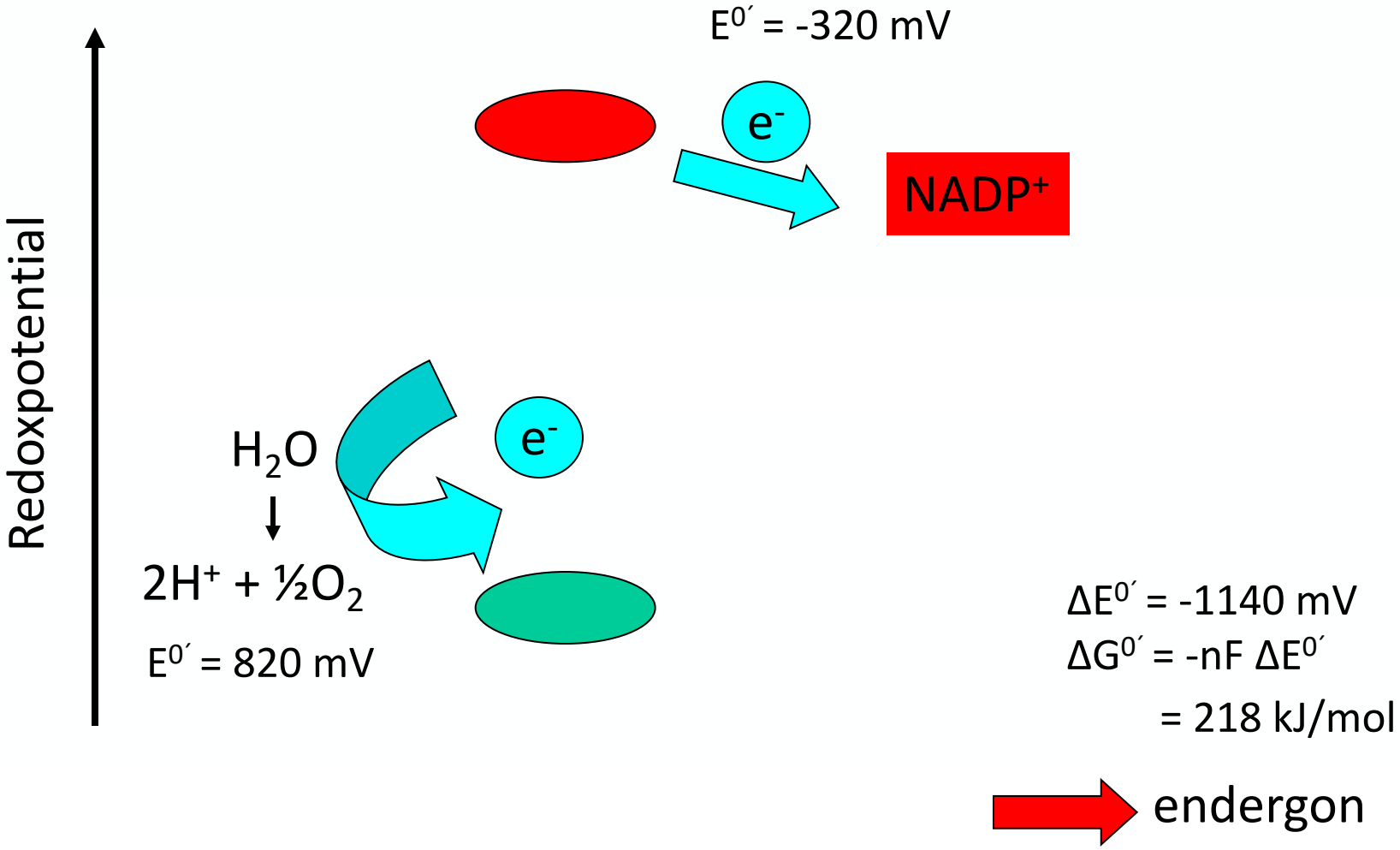
$$C_6H_{12}O_6 + 6\ O_2$$

Photosynthese, ein Redoxvorgang

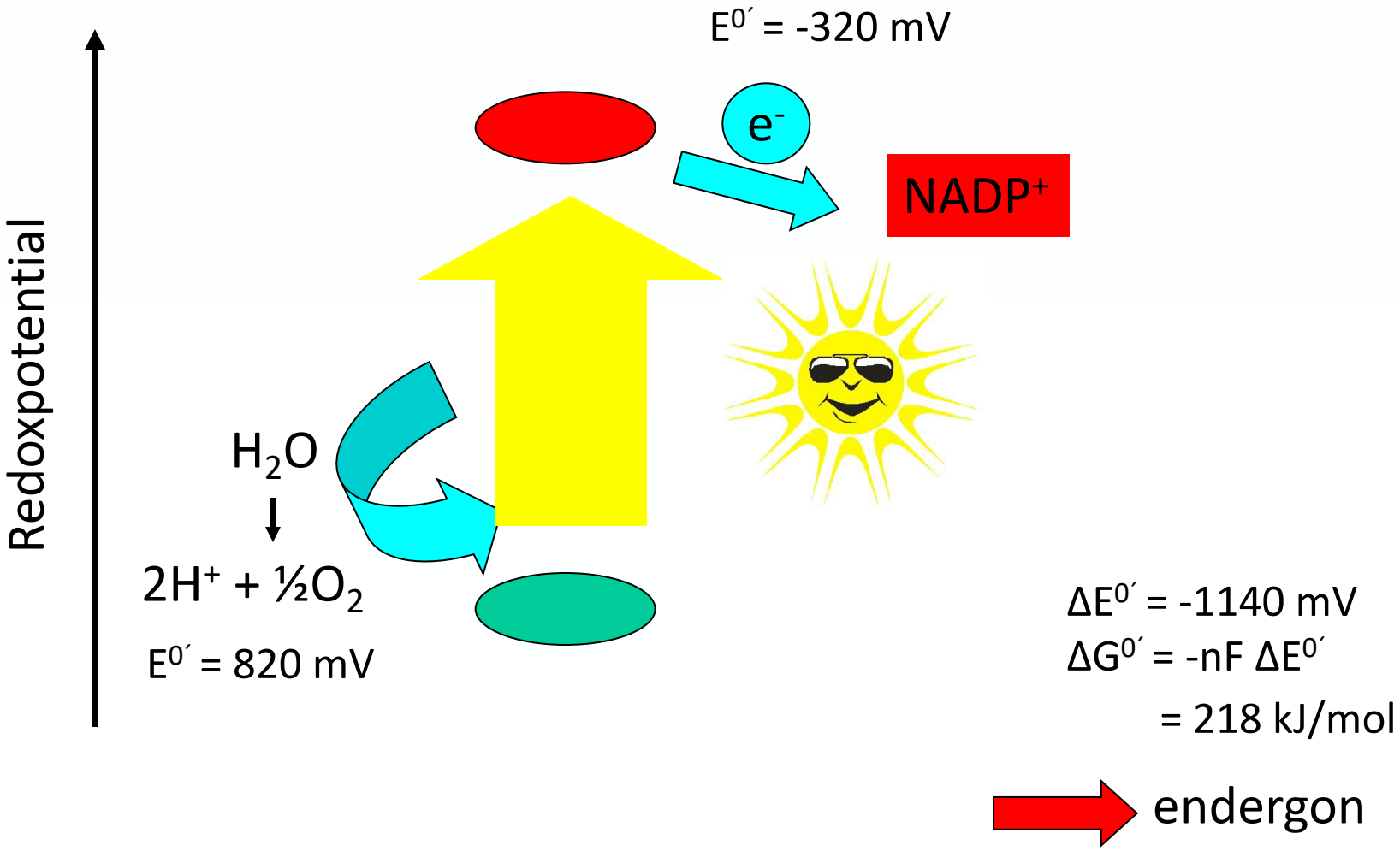


	$H_20 + NADP^+$	→	$½\ O_2 + NADPH + H^+$
Reduktionsmittel	H_20	→	$½\ O_2 + 2H^+ + 2e^-$
Oxidationsmittel	$NADP^+ + 2H^+ + 2e^-$	→	$NADPH + H^+$

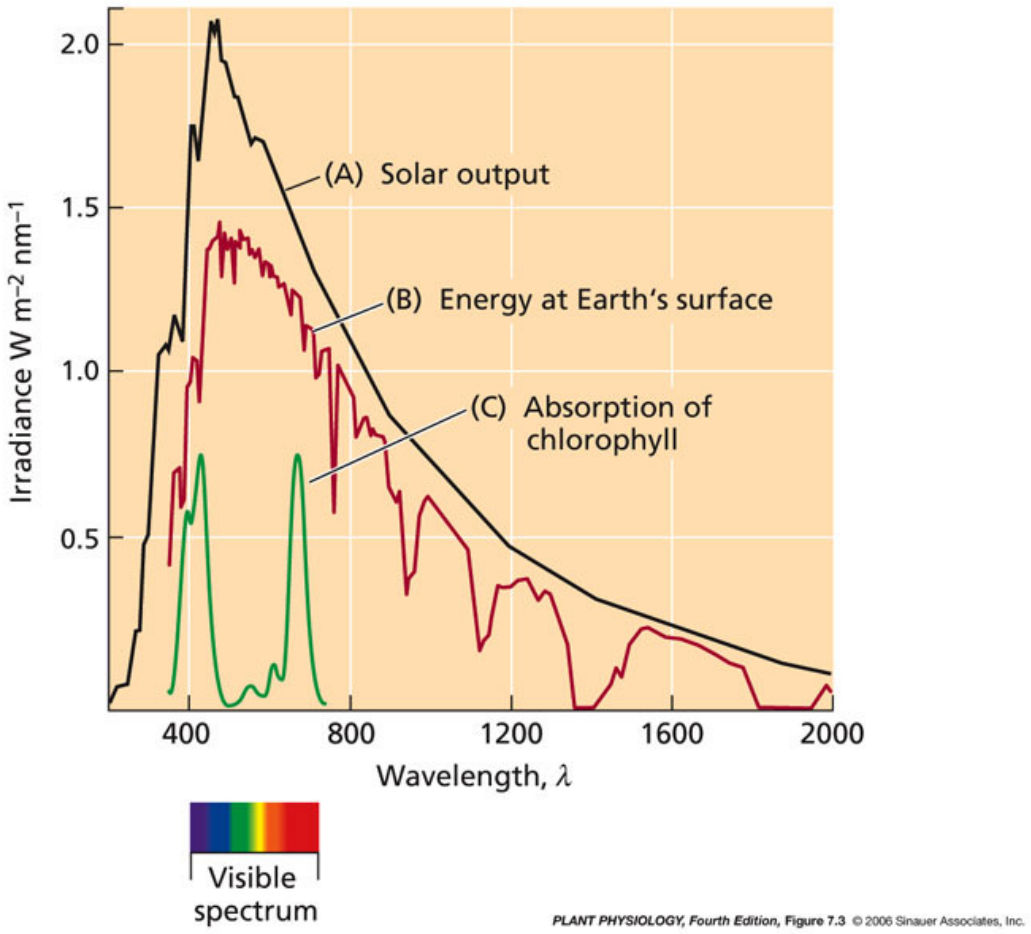
Photosynthese, ein Redoxvorgang



Photosynthese, ein Redoxvorgang

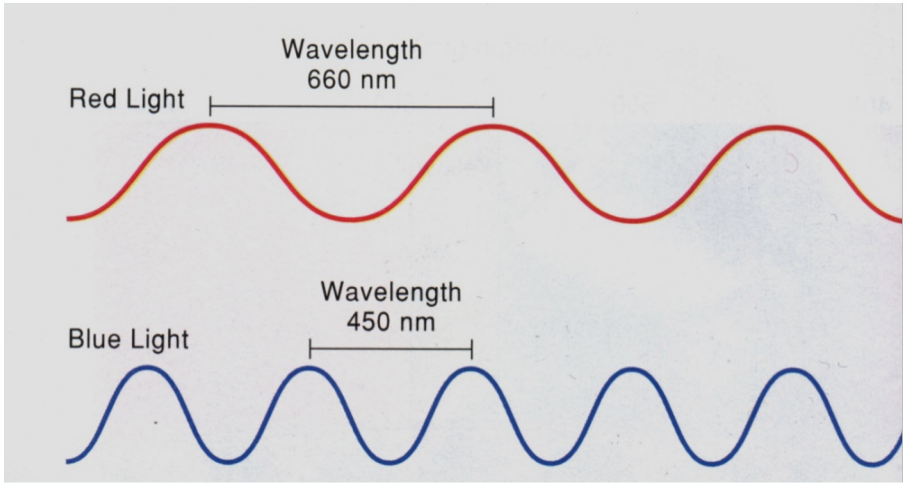


Was ist Licht?

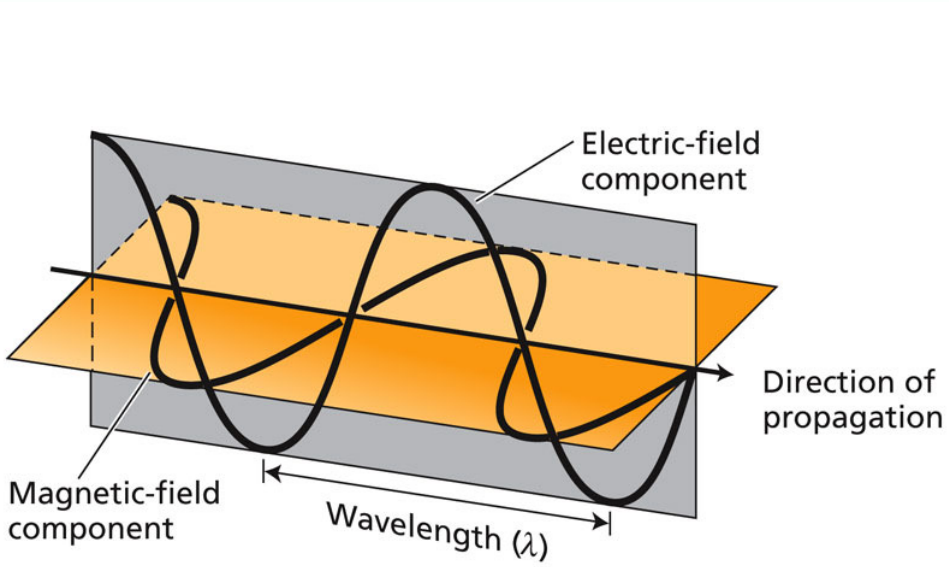


PLANT PHYSIOLOGY, Fourth Edition, Figure 7.3 © 2006 Sinauer Associates, Inc.

Was ist Licht?



Was ist Licht?



PLANT PHYSIOLOGY, Fourth Edition, Figure 7.1 © 2006 Sinauer Associates, Inc.

Licht: ein Strom von Teilchen (Photonen) einer bestimmten Energie (Quantum).

Die Energie des Quantums ist umgekehrt proportional zur Wellenlänge λ!!

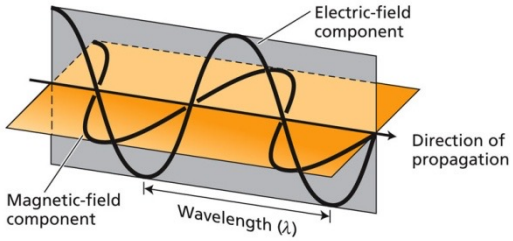
Lichtenergie

Licht hat sowohl Wellen- als auch Partikeleigenschaften.

In der Quantenmechanik wird Licht als ein Strom energie-tragender Partikel, sogenannter QUANTEN, betrachtet.

Jedes Lichtquant (oder auch jedes Photon) trägt eine bestimmte Menge an Energie E, die der Planck´schen Konstante entspricht $h = 6{,}626 \times 10^{-34}$ [Joule · s] multipliziert mit der Frequenz der Strahlung ν [s^{-1}].

Somit ist die Energie eines Lichtquants oder Photons:



$$E = h\nu \text{ [Joule]}$$

Lichtenergie

Die Frequenz der Strahlung ν [s^{-1}] kann man auch mit der Formel

$$\nu = {}^{c}/_{\lambda}\ [s^{-1}]$$

beschreiben, wobei
c die Lichtgeschwindigkeit [3 x 10^8 m s^{-1}] und
λ die Wellenlänge des Lichtes [m] ist .

Daraus ergibt sich:

$$E = h\nu = h \cdot {}^{c}/_{\lambda}\ [\text{Joule}]$$

Für 1 Mol Photonen (1 Einstein) der Wellenlänge 700 nm:

$E = 6{,}6 \cdot 10^{-34}\ [Js] \cdot 3 \cdot 10^{8}\ [ms^{-1}] \cdot 6 \cdot 10^{23}\ [mol^{-1}]\ /\ 700 \cdot 10^{-9}\ [m]) = 170\ kJ/mol$

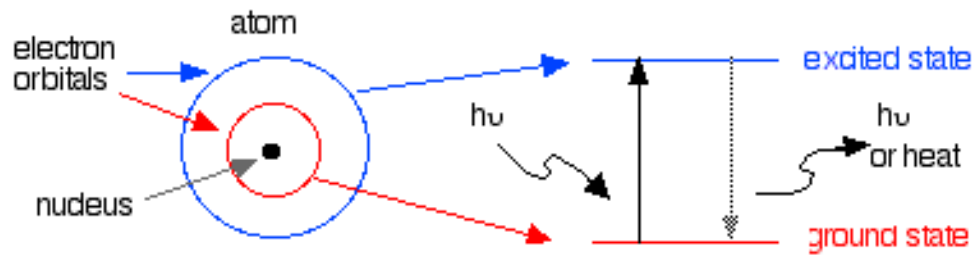
Für 1 Mol Photonen (1 Einstein) der Wellenlänge 450 nm:

$E = 6{,}6 \cdot 10^{-34}\ [Js] \cdot 3 \cdot 10^{8}\ [ms^{-1}] \cdot 6 \cdot 10^{23}\ [mol^{-1}]\ /\ 450 \cdot 10^{-9}\ [m]) = 270\ kJ/mol$

Lichtqualität und -quantität

$E = h*c/\lambda$

$h = 6{,}626 * 10^{-34}\ J * s$
$c = 3 * 10^{8}\ m * s^{-1}$



$\Rightarrow$ 1 Photon bei 450 nm: $4{,}4 * 10^{-19}$ J
1 Mol Photonen bei 450 nm: $2{,}7 * 10^{5}$ J = 270 kJ

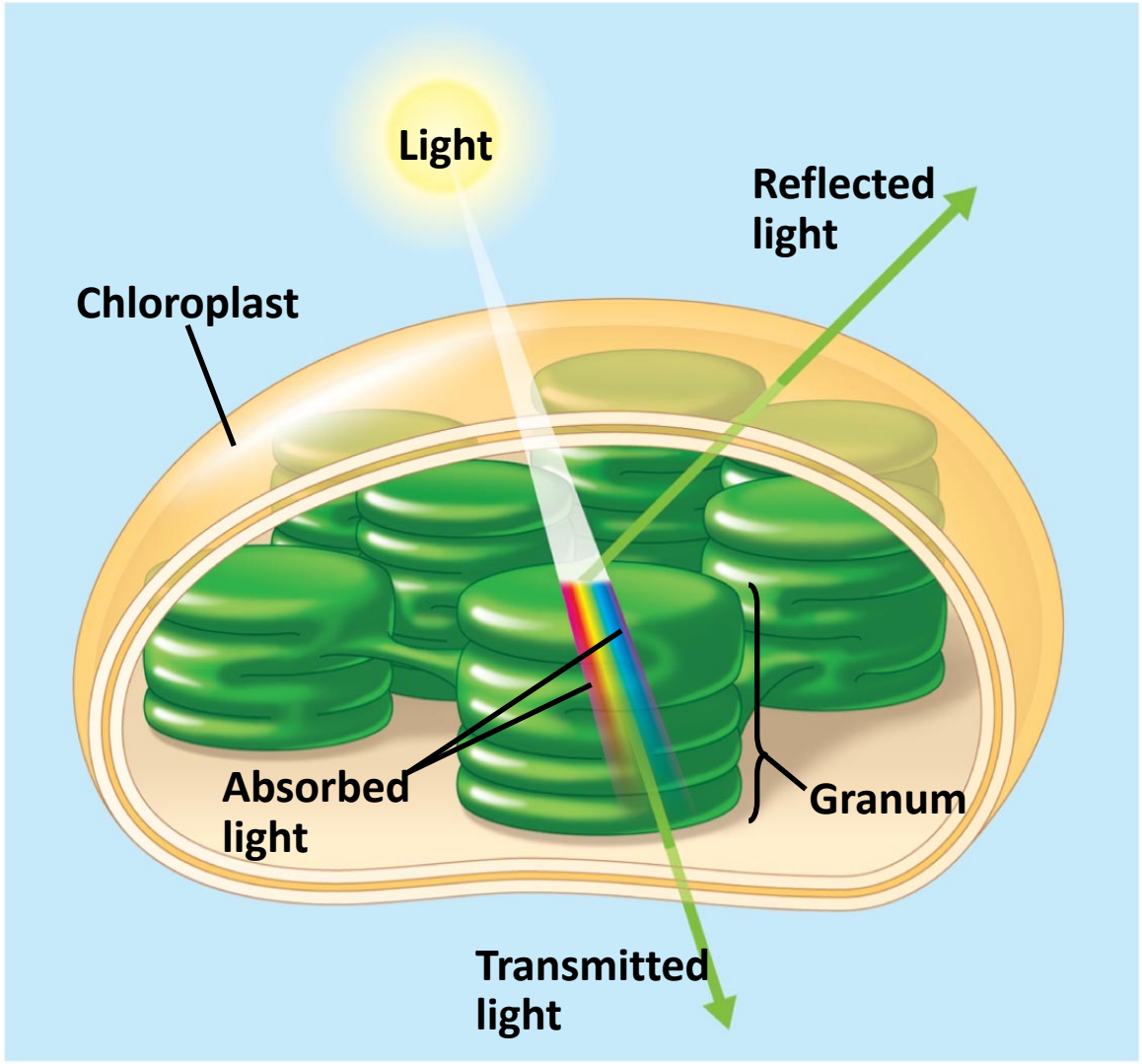
Fluss = Mol / Fläche ($\mu mol * m^{-2}$)
Flussrate = Mol / Fläche / Zeit ($\mu mol * m^{-2} * s^{-1}$)

1 J = $3{,}76 * 10^{-6}$ Mol Photonen (450 nm)

$3\ W * m^{-2} = 3\ J * m^{-2} * s^{-1} = 11{,}28\ \mu mol * m^{-2} * s^{-1}$

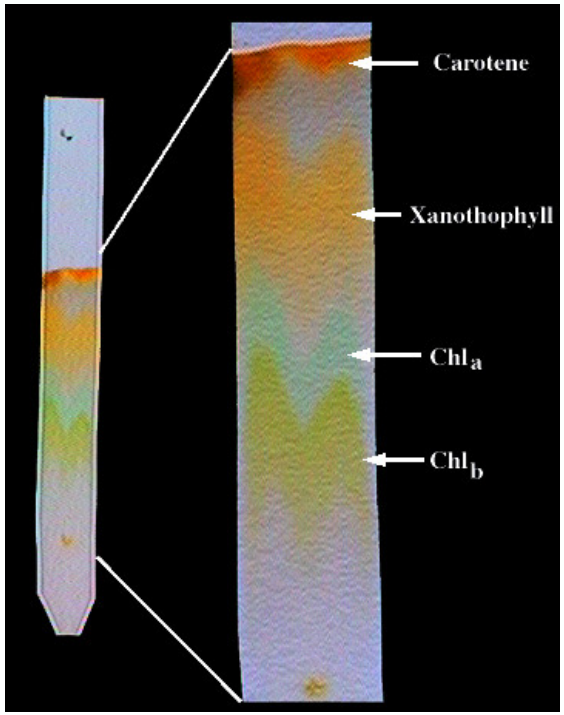
Wie wird Licht biologisch aktiv??
Welche Wellenlängen sind aktiv??

Warum sind Pflanzen grün?



Copyright © 2008 Pearson Education, Inc., publishing as Pearson Benjamin Cummings.

Aufreinigung der Pigmente



Carotin

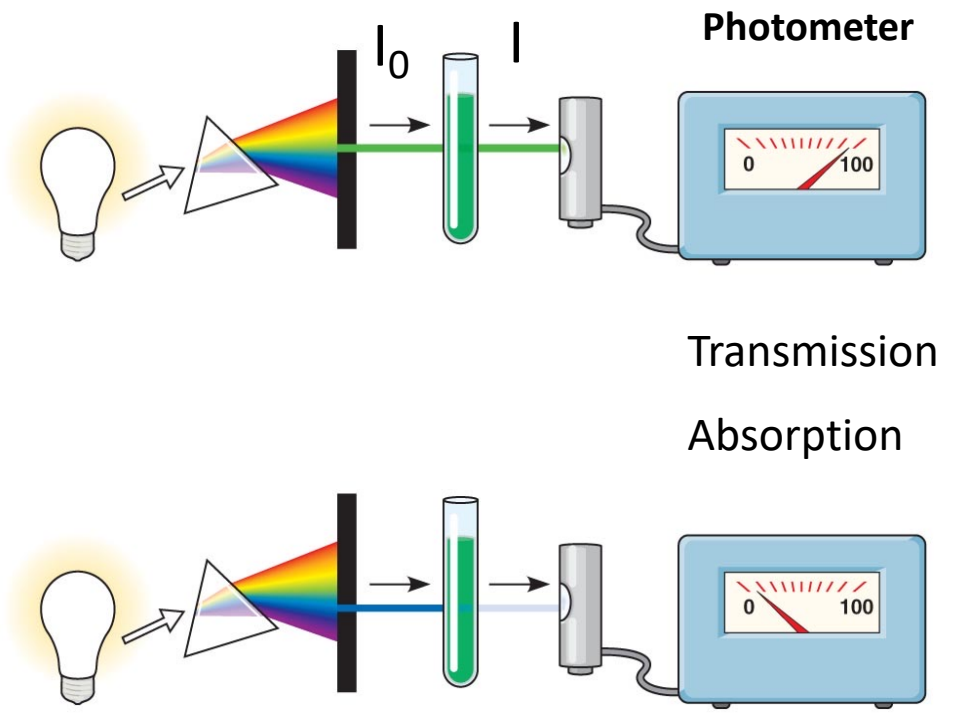
Xanthophyll

Chlorophyll a

Chlorophyll b

Pigmente der Photosynthese

Bestimmung der Absorptionsspektren

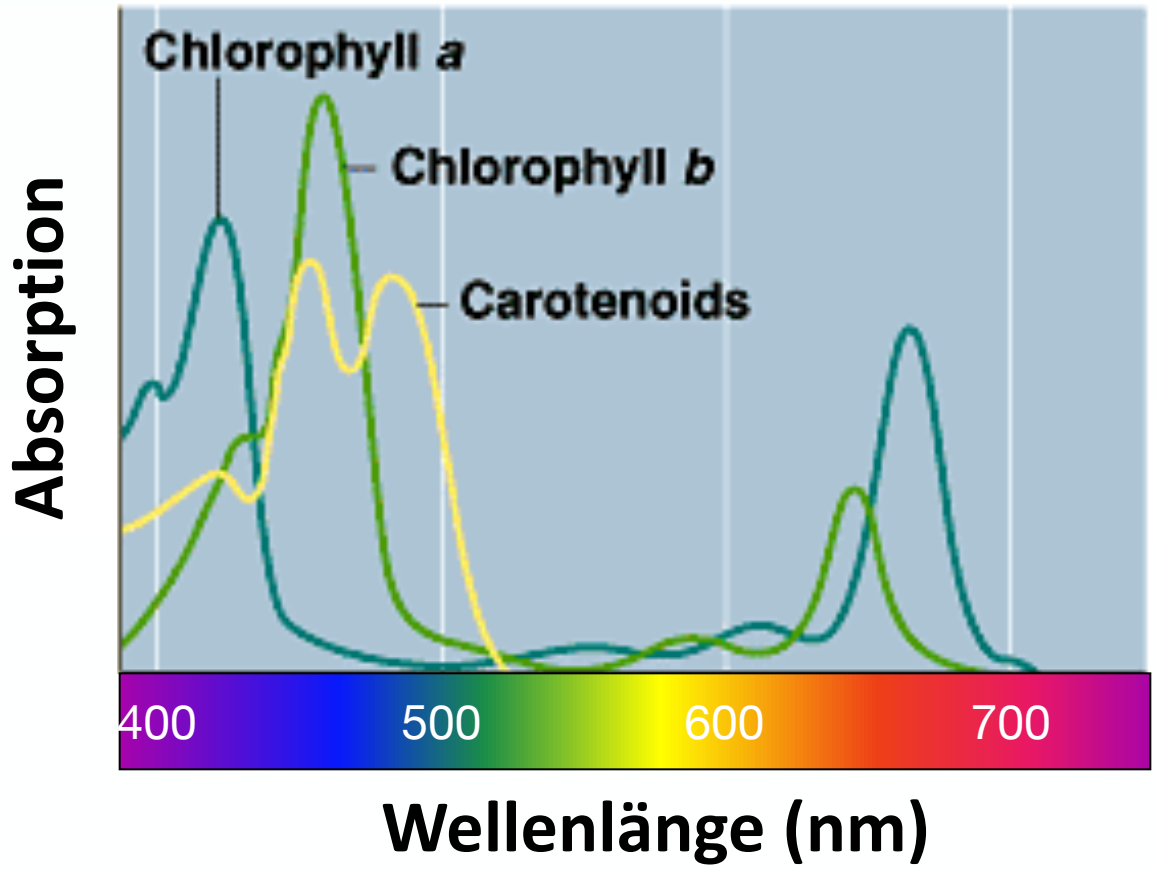


Transmission $T = I/I_0$

Absorption $A = 1-T$

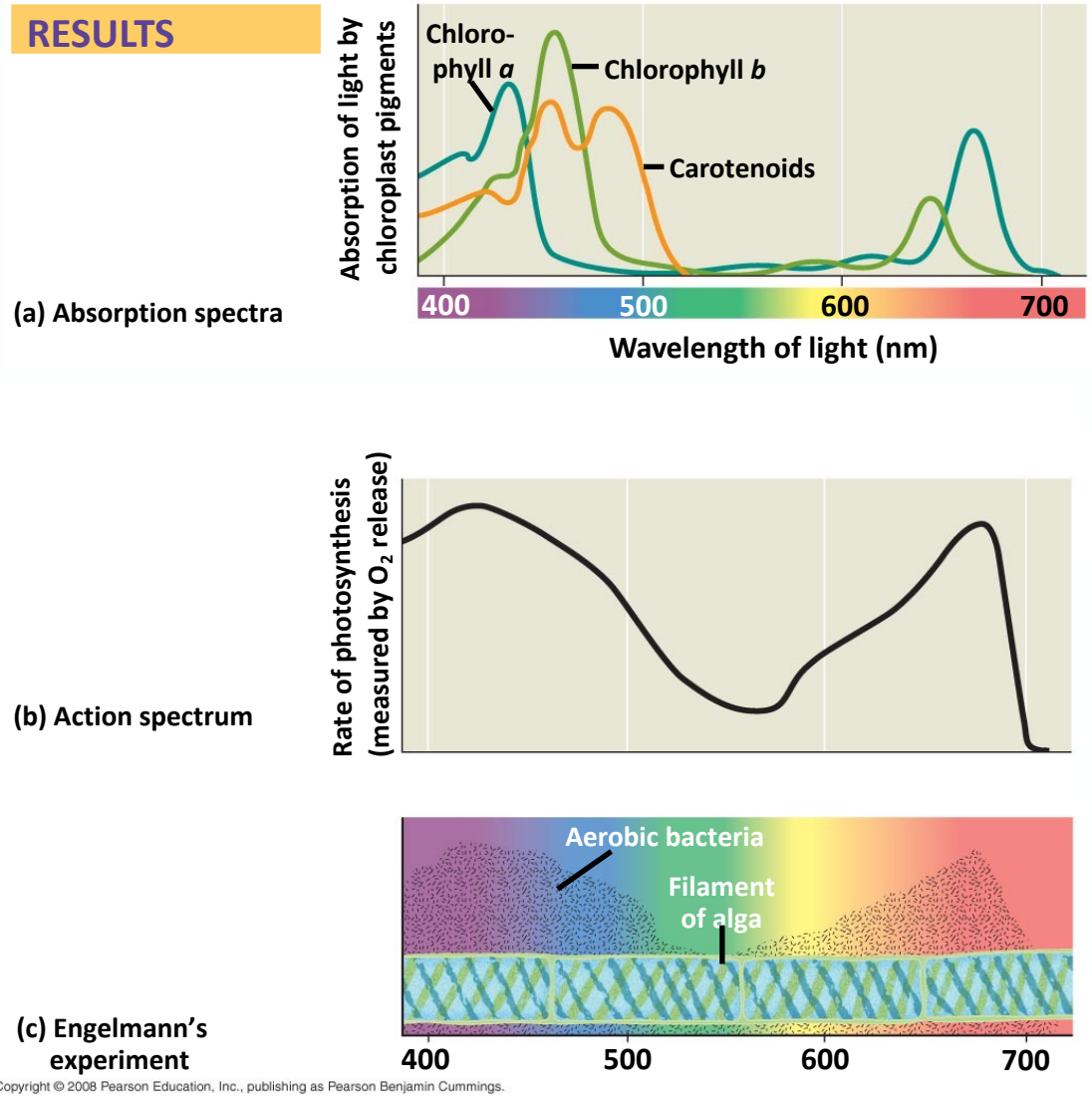
Copyright © 2008 Pearson Education, Inc., publishing as Pearson Benjamin Cummings.

Absorptionsspektren der Pigmente



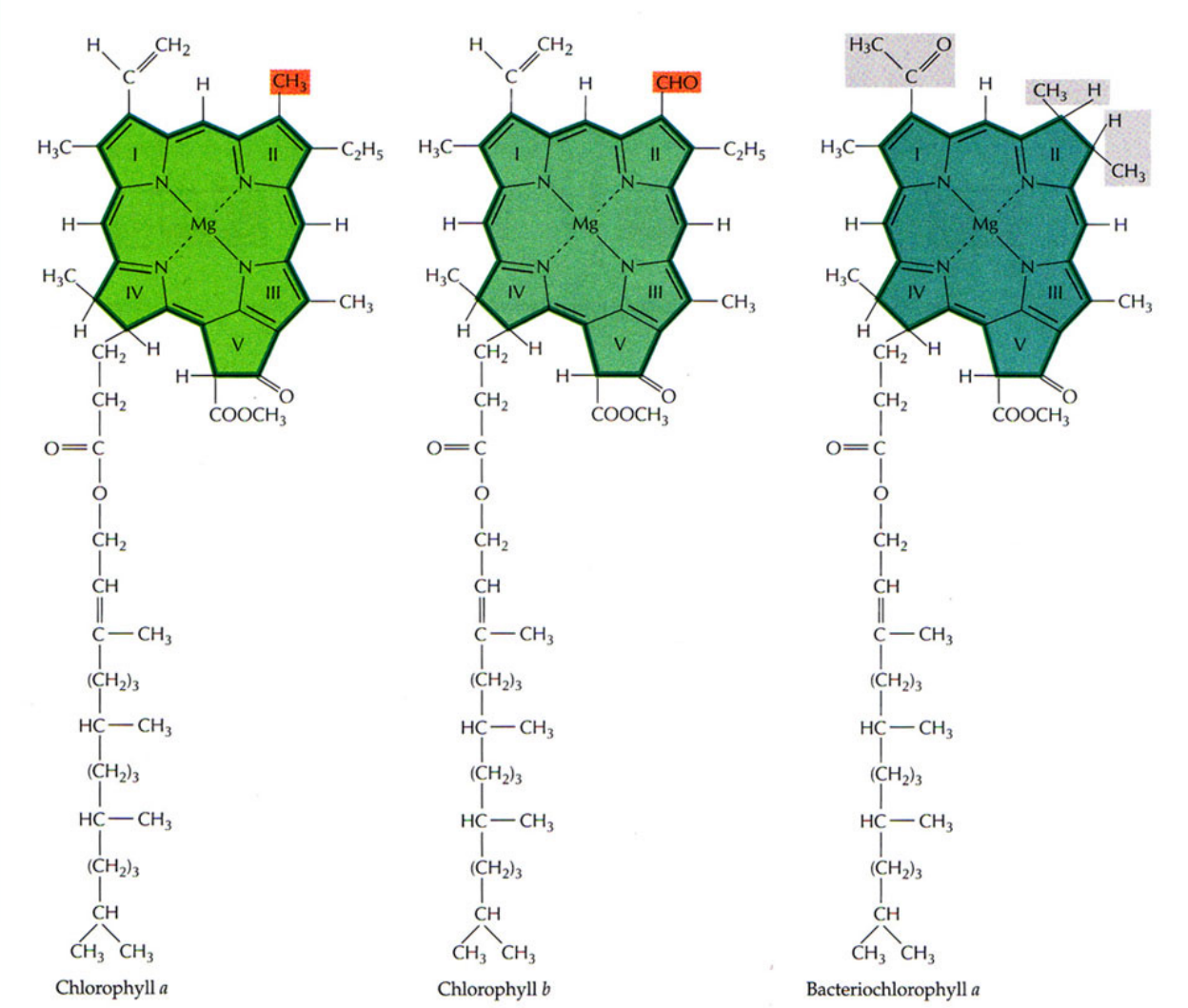
Carotinoide absorbieren in der „Grünlücke“ des Chlorophylls

Absorptions- und Aktionsspektrum



Copyright © 2008 Pearson Education, Inc., publishing as Pearson Benjamin Cummings.

Chlorophylle



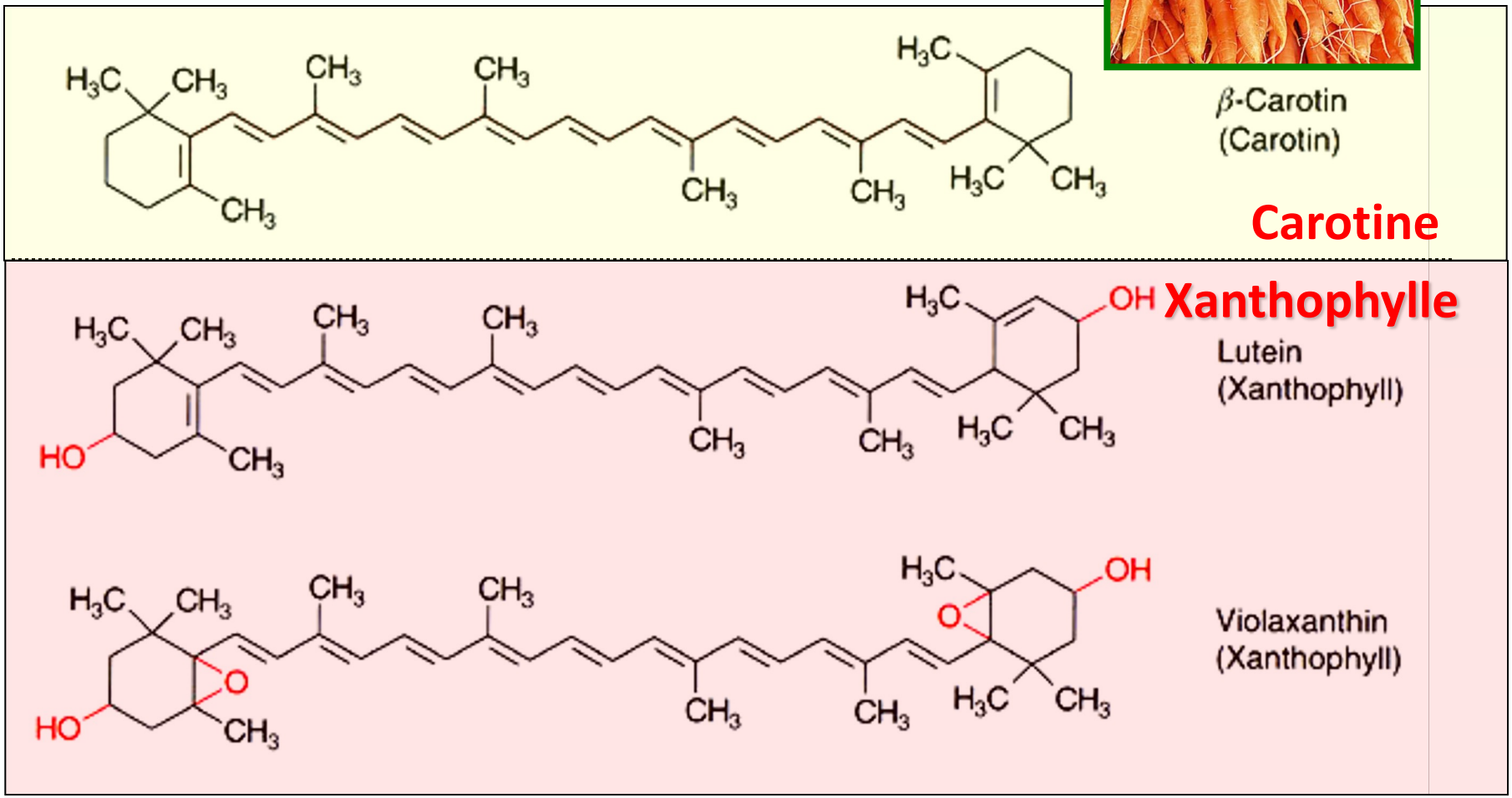
Ringförmige Tetrapyrrole

=

Porphyrine

Phytolrest

Carotinoide



Carotine sind reine Kohlenwasserstoffe (Tetraterpene),
Xanthophylle sind oxidierte Carotine, d.h. besitzen O(H)-Gruppen.

Die Absorption des Lichts

- **Die Absorption eines Lichtquants ist die Voraussetzung dafür, dass Lichtenergie in chemische Energie umgewandelt wird !**
- **Lichtabsorption durch Pigmente (bzw. deren Chromophore)**
- **Pigment = Chromophor (griech. "Farbträger" + Protein)**
- **Durch die Absorption eines Lichtquants durch ein Pigment wird dies aus einem Zustand niedriger Energie in einen angeregten Zustand (*) höherer Energie überführt:**

$$\text{Pigment} \xrightarrow{h\nu} \text{Pigment}^*$$

Die Anregung eines Pigments

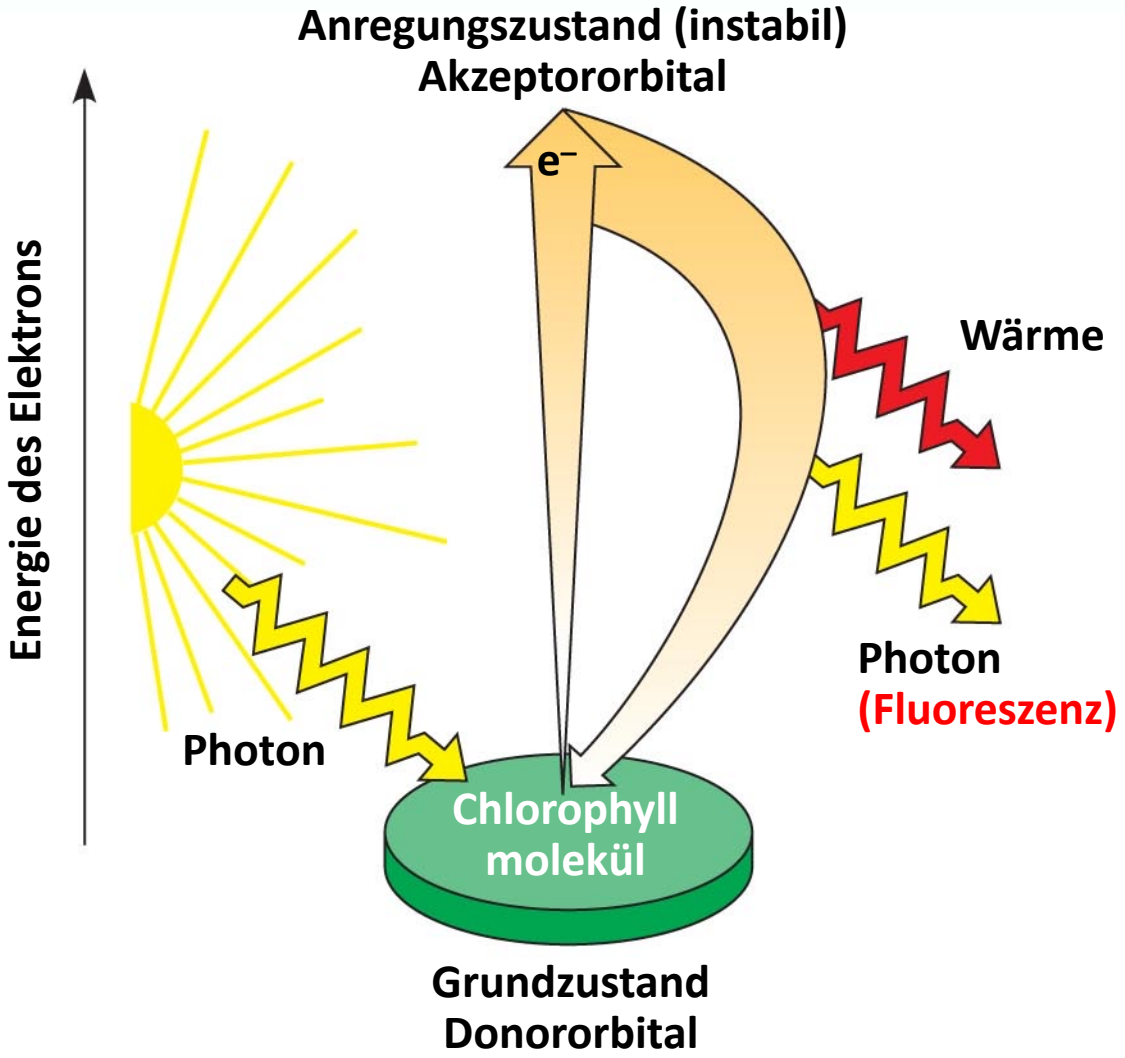
- **Für die Anregung eines Pigments wird ein Elektron (e^-) auf ein angeregtes (energiereicheres) Orbital angehoben.**

- **Nach den Gesetzen der Quantenmechanik erfolgt dies nur, wenn die Energie des eingestrahlten Lichtes exakt mit der Energiedifferenz des e^- auf dem Ausgangsorbital E_a und auf dem angeregten Orbital E_{ex} übereinstimmt. D.h. wenn:**

$$E_{ex} - E_a = h\,c/\lambda$$

- **Dies bedeutet, dass ein photosynthetisch aktiver Organismus seine lichtabsorbierenden Pigmente exakt auf die Qualität des einfallenden Lichtes in seinem Lebensraum optimieren muss !**

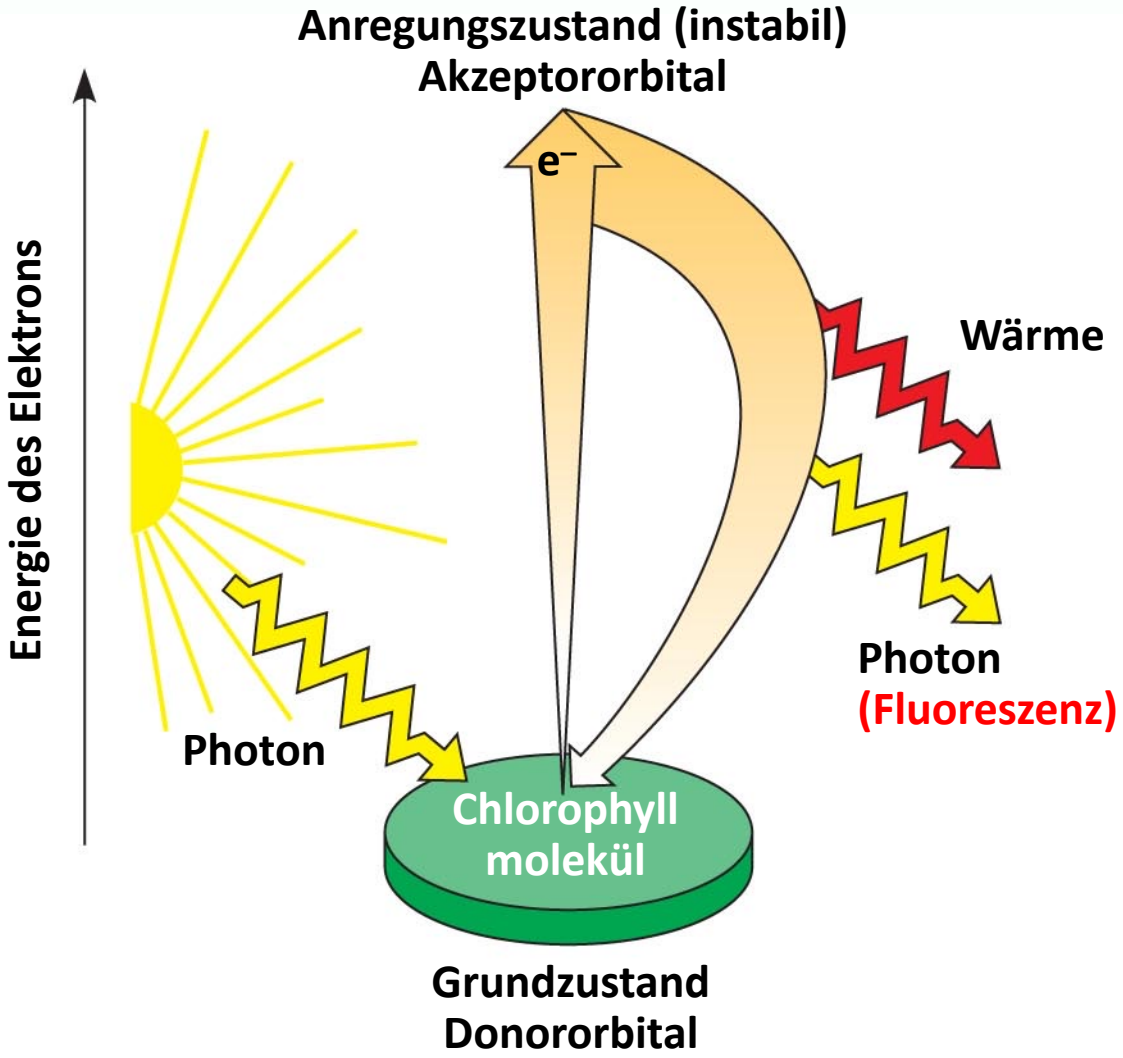
Die Absorption des Lichts



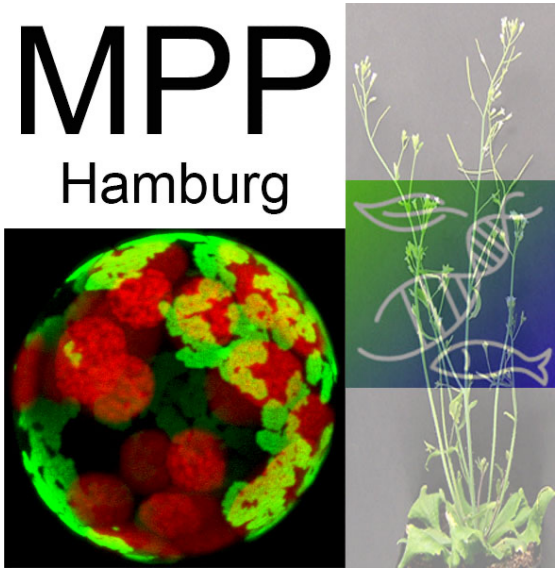
Copyright © 2008 Pearson Education, Inc., publishing as Pearson Benjamin Cummings.

Anregung und Fluoreszenz

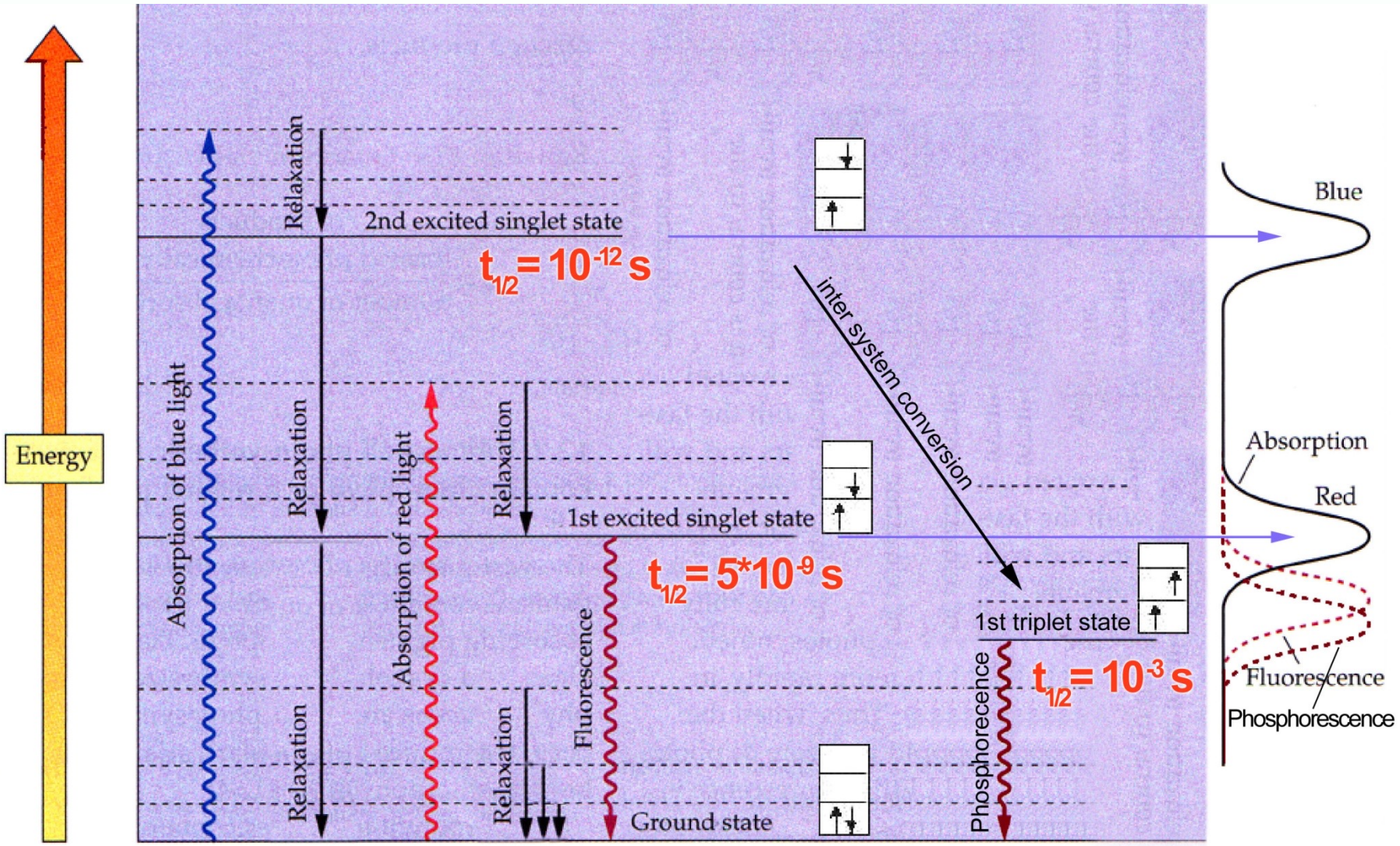
Anregung und Fluoreszenz



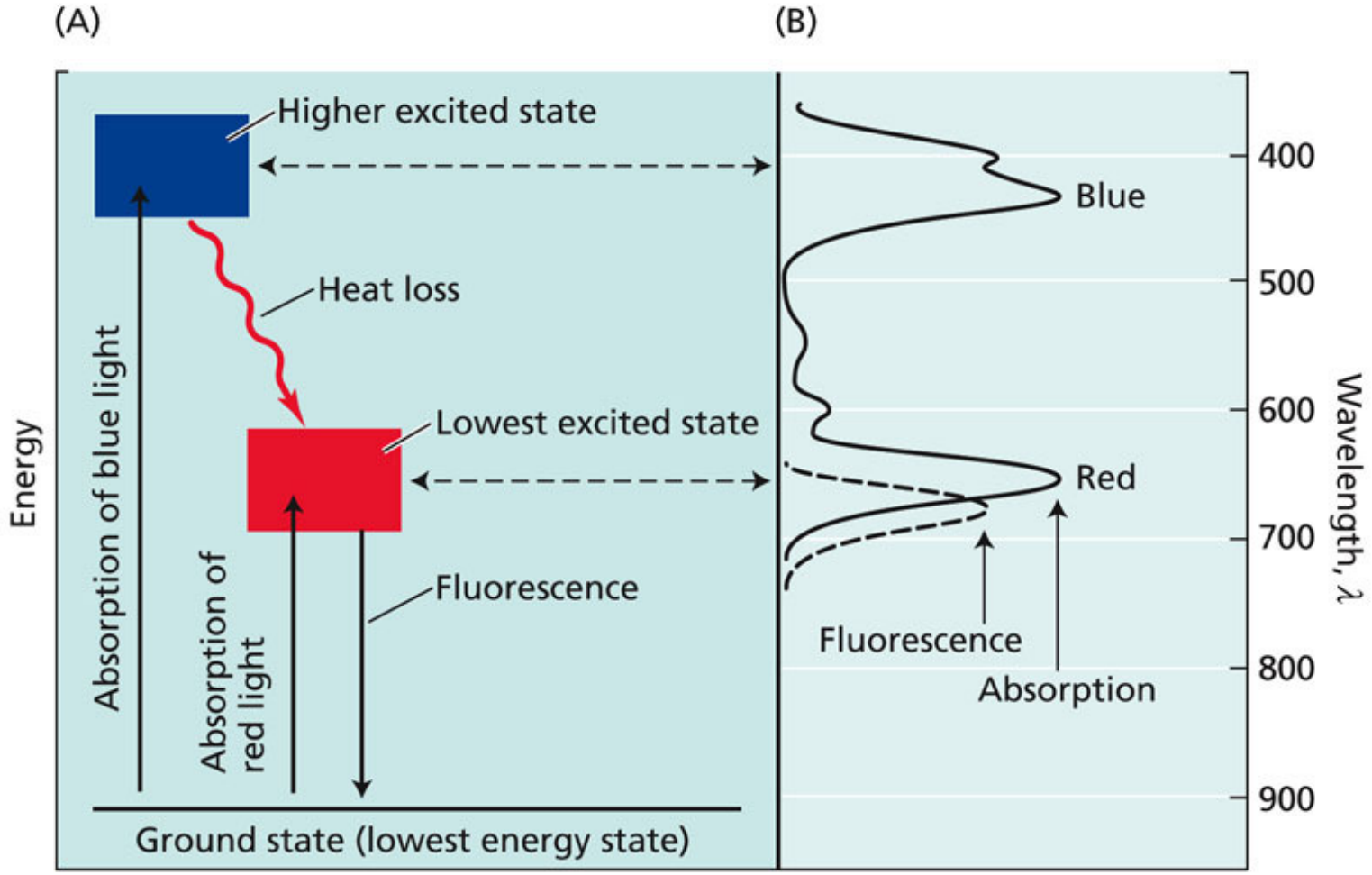
Copyright © 2008 Pearson Education, Inc., publishing as Pearson Benjamin Cummings.



Jablonski-Diagramm für Chlorophyll



Vereinfachtes Jablonski Diagramm



PLANT PHYSIOLOGY, Fourth Edition, Figure 7.5 © 2006 Sinauer Associates, Inc.

Abgabe der Anregungsenergie

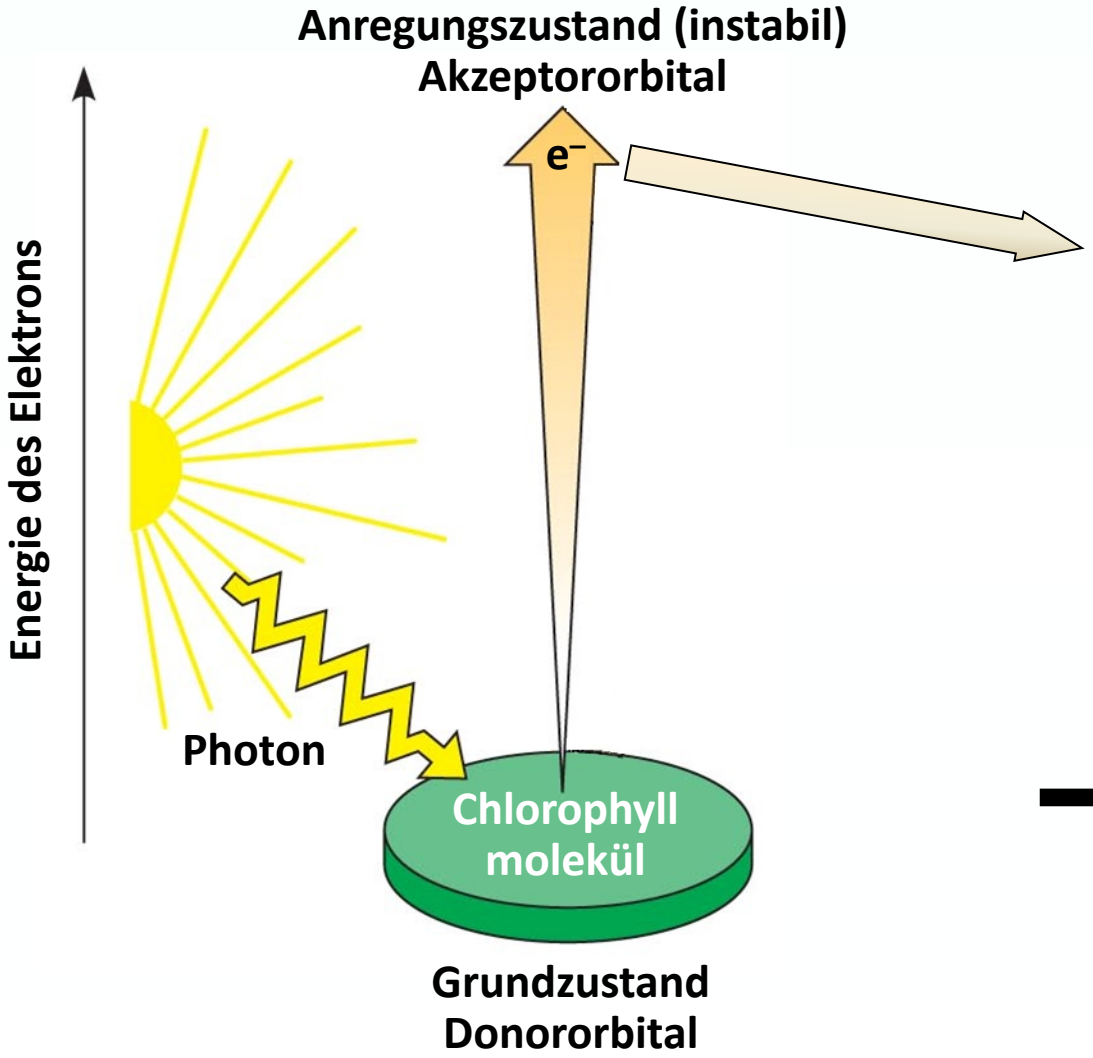
Die Rückkehr eines Elektrons auf einen energieärmeren Zustand kann auf verschiedene Arten erfolgen:

A) durch **Relaxation**, d.h. durch die Abgabe von Wärmeenergie
B) durch **Fluoreszenz**, d.h. durch die Abgabe eines Photons
C) durch **Phosphoreszenz** d.h. durch Spinumkehr und Abgabe eines Photons
D) durch **Energietransfer (Excitonentransfer)**, d.h. durch Abgabe der Energie des e^- an das e^- eines anderen Pigments
E) durch **Ladungstrennung**, d.h. durch das Abgeben eines angeregten e^- an ein anderes Molekül

D) ist wichtig bei der Weitergabe der Anregungsenergie

E) ist wichig bei der Reduktion eines Akzeptormoleküls im Reaktionszentrum ($\Rightarrow$ Elektronentransportkette)

Elektronen und Lichtenergie



Photochemie:
Abgabe des Elektrons
➡ Ladungstrennung

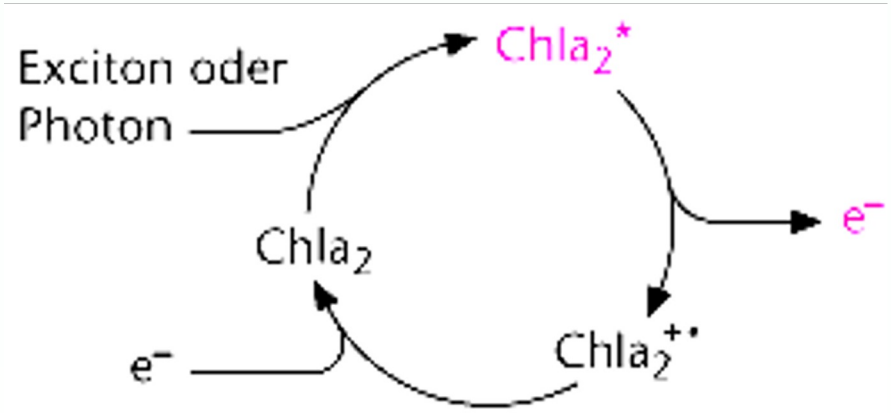
Akzeptororbital ist
Reduktionsmittel

➡ Donororbital wird
Oxidationsmittel

Ladungstrennung im Chlorophyll

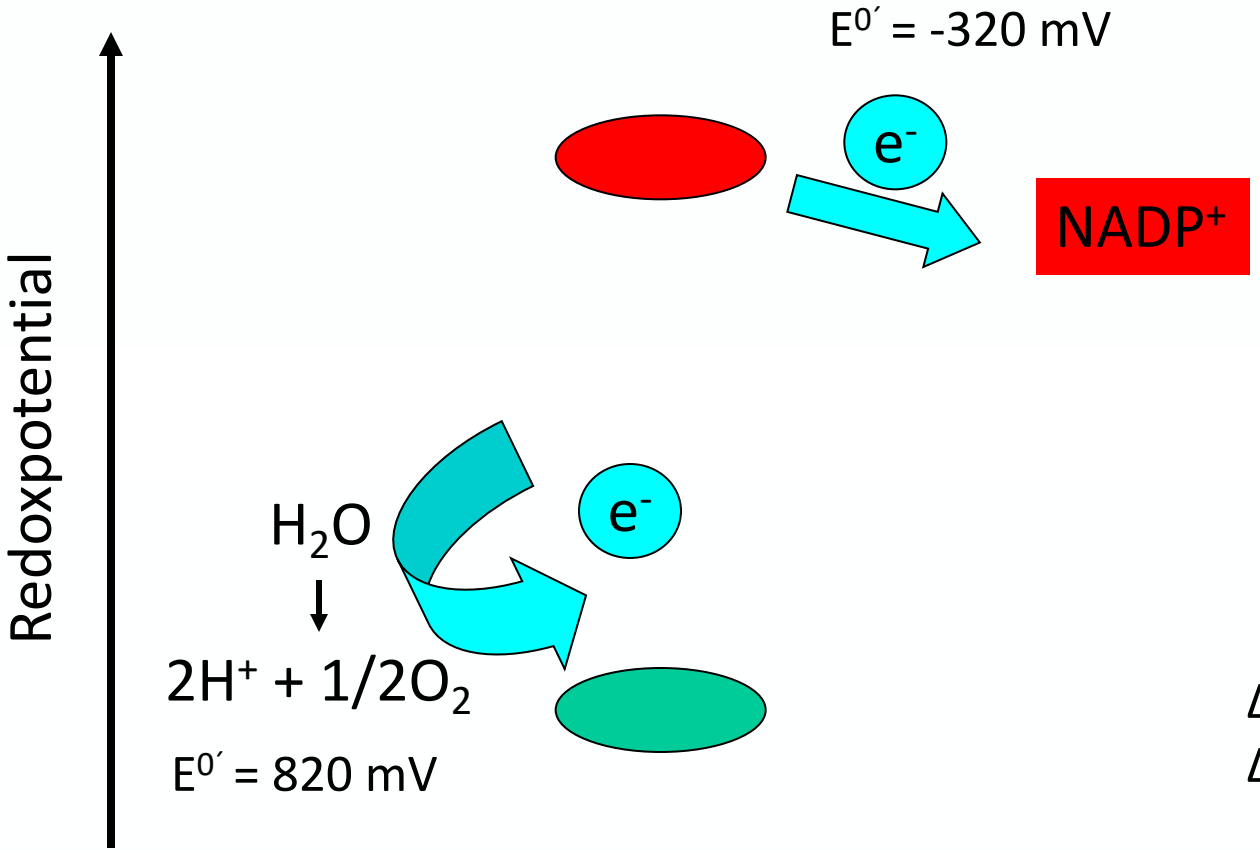
Die Lebensdauer des S1 Zustands des angeregten Chlorophylls liegt im Bereich von **Nanosekunden (10^{-9} s)**;

Die photochemische **Ladungstrennung** (das Abgeben eines angeregten e^- an ein anders Molekül) dauert **Picosekunden (ca. 3,5 ps; $3,5 \cdot 10^{-12}$ s)**;



Aufgrund der Schnelligkeit der Reaktion und der optimierten e^--Übertragung gibt es bei der Photosynthese praktisch keine Fluoreszenz und sie kann mit hoher Effizienz ablaufen!

Photosynthese, ein Redoxvorgang



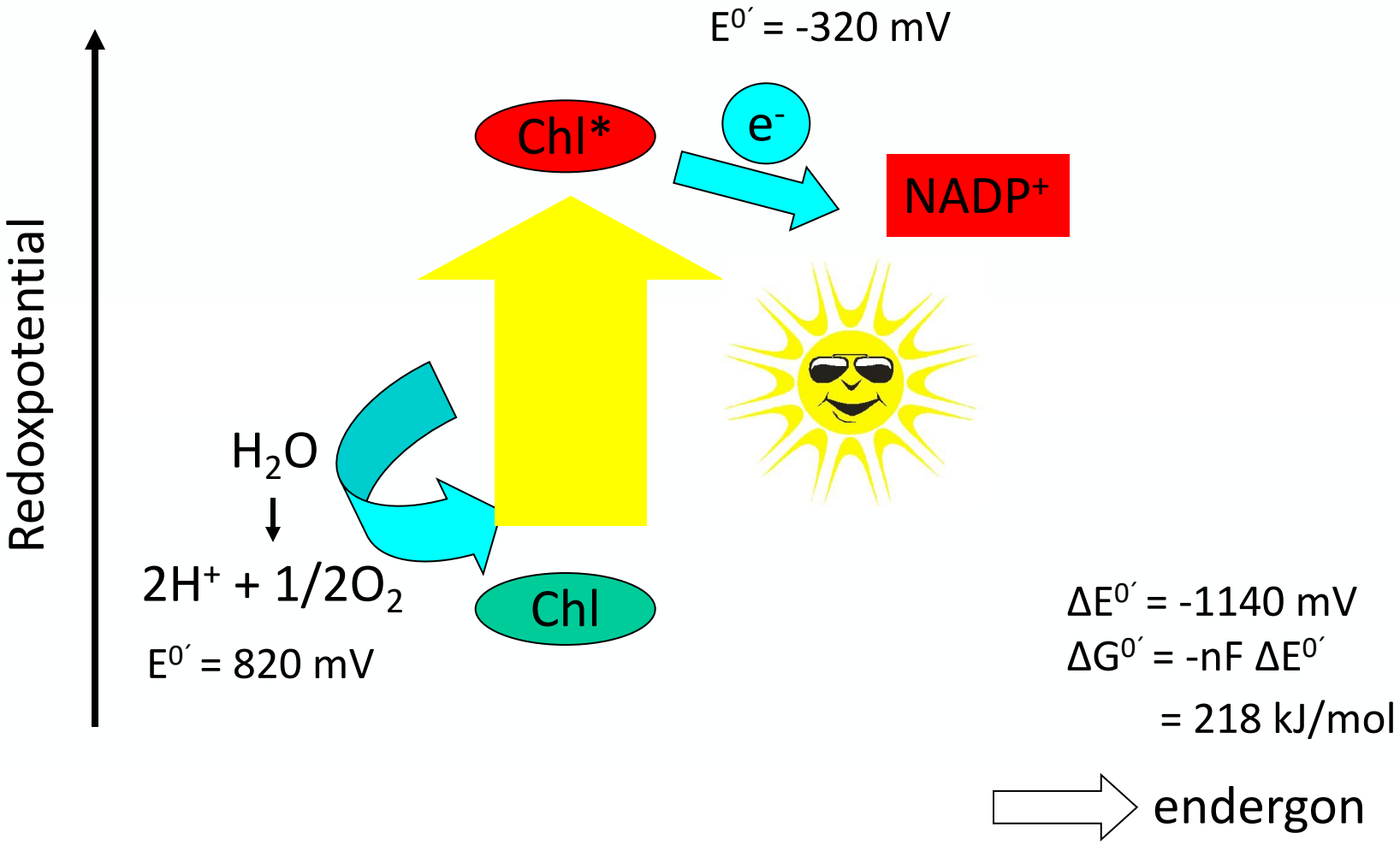
$\Delta E^{0'}$ = -1140 mV

$\Delta G^{0'} = -nF\ \Delta E^{0'}$

= 218 kJ/mol

endergon

Photosynthese, ein Redoxvorgang

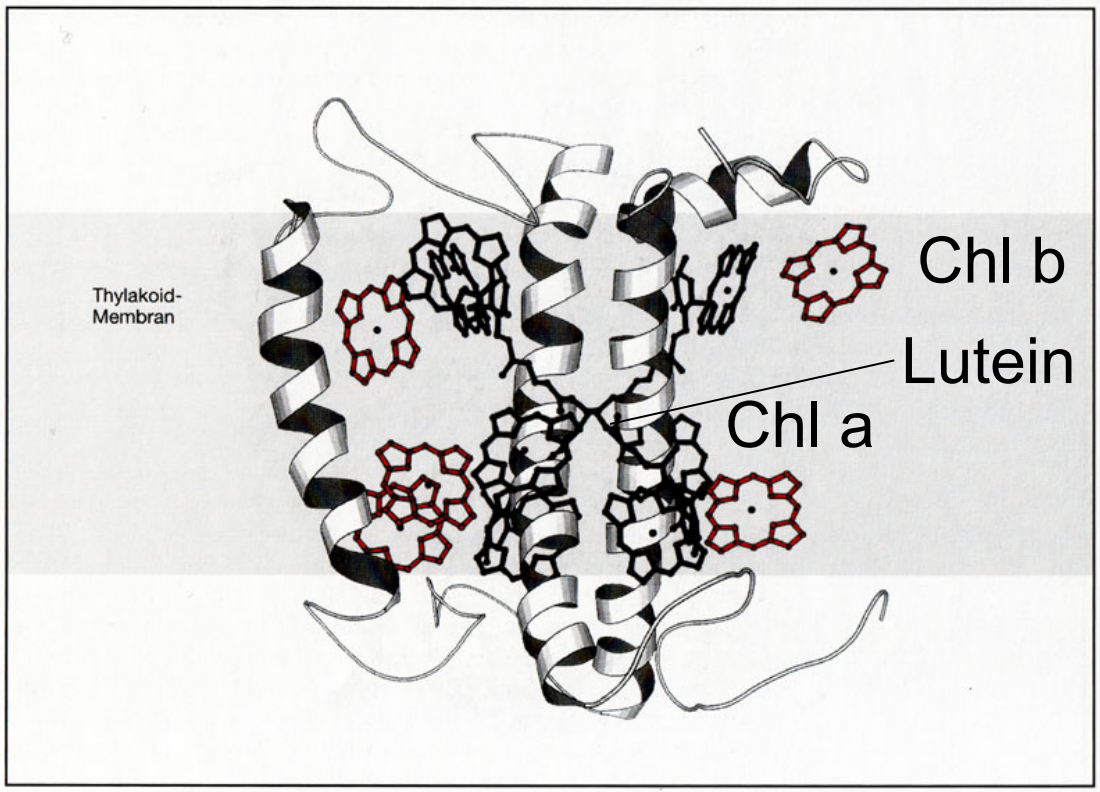


Aufbau des Lichtsammelkomplexes (LHC)

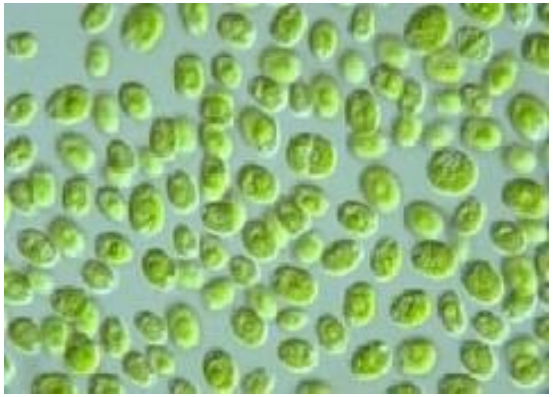
Jeder Lichtsammelkomplex (Light Harvesting Complexes LHC) besteht aus Protein und mehreren Chromophoren (Chlorophylle a und b und Carotinoide)

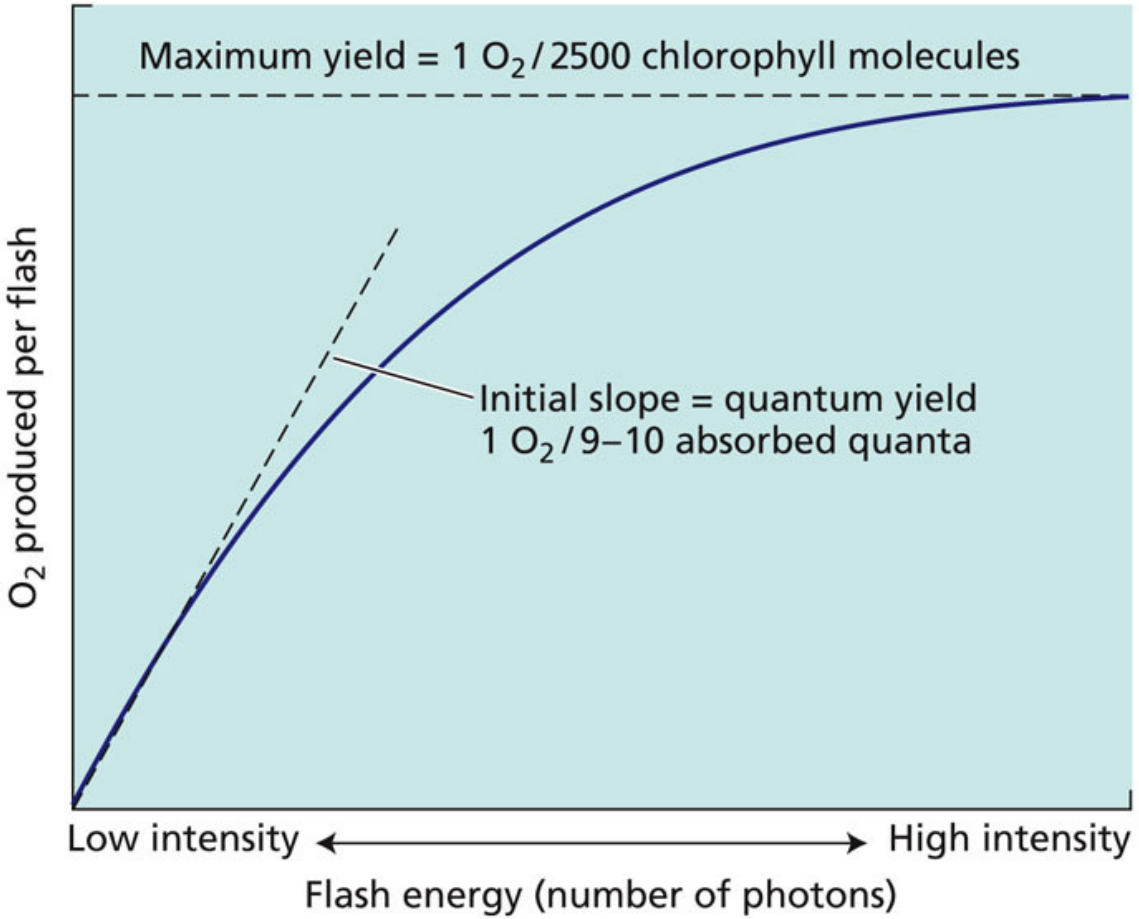
z.B.
LHC-II:

Monomer
von der Seite



Die Quantenausbeute




Maximum yield = 1 O_2 / 2500 chlorophyll molecules
Initial slope = quantum yield
1 O_2 / 9–10 absorbed quanta
O_2 produced per flash
Low intensity
High intensity
Flash energy (number of photons)
re 7.11 © 2006 Sinauer Associates, Inc.

$$\Phi = \frac{\text{yield of photochemical products}}{\text{total number of quanta absorbed}}$$

Viele Antennenpigmente arbeiten zusammen

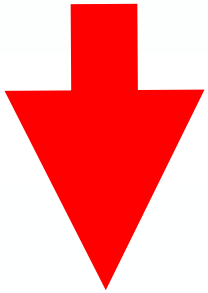
Emerson **und** ***Arnold*** **(1932) konnten zeigen, dass**

a) bei Lichtsättigung nur
1 O_2 Molekül / 2500 Chlorophylle
($4e^-$ ➡ 625 Chlorophylle / e^-)
synthetisiert wird
und
b) der minimale Quantenbedarf der Photosynthese
= 8 Lichtquanten / 1 O_2 ist

Heute wissen wir, dass es zwei Reaktionszentren gibt: 1250/4 ≈ 300, d.h. etwa 300 Antennen-Chlorophyllmoleküle gehören zu einem Photosystem und folglich 4 Quanten pro PS benötigt werden.

Wie wird die Lichtabsorption optimiert ?

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Photon direkt auf das Chlorophyll-Molekül im reaktiven Zentrum eines der beiden Photosysteme trifft, ist sehr gering



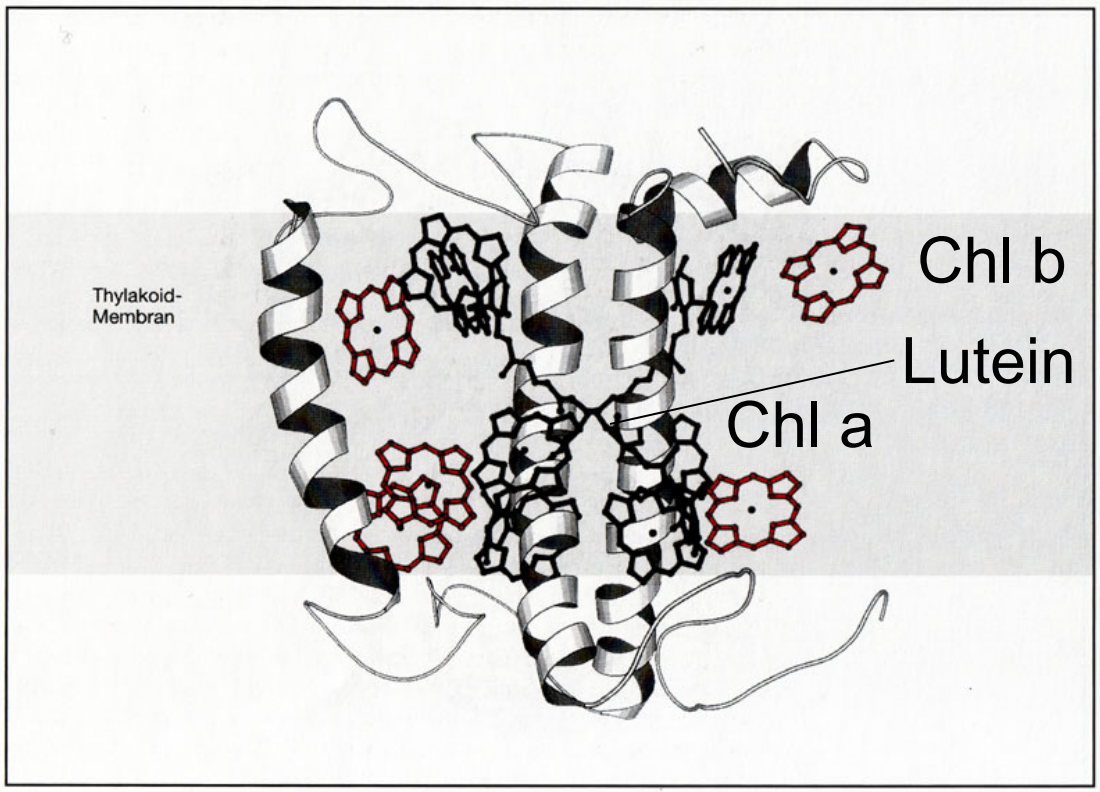
daher haben die Pflanzen „Lichtantennen“ entwickelt, die das Licht nach Art einer Satellitenschüssel einfangen können und dessen Energie zu dem Chlorophyll im PSI oder im PSII leiten

Aufbau des Lichtsammelkomplexes (LHC)

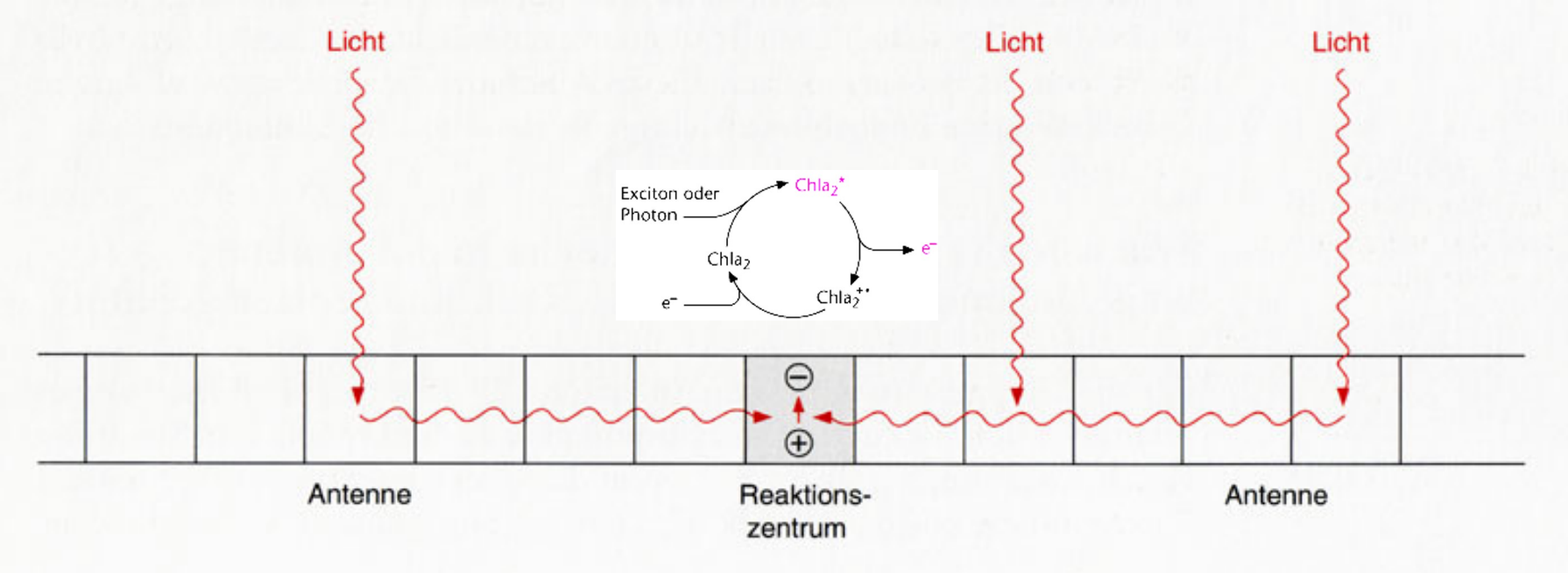
Jeder Lichtsammelkomplex (Light Harvesting Complexes LHC) besteht aus Protein und mehreren Chromophoren (Chlorophylle a und b und Carotinoide)

z.B.
LHC-II:

Monomer
von der Seite



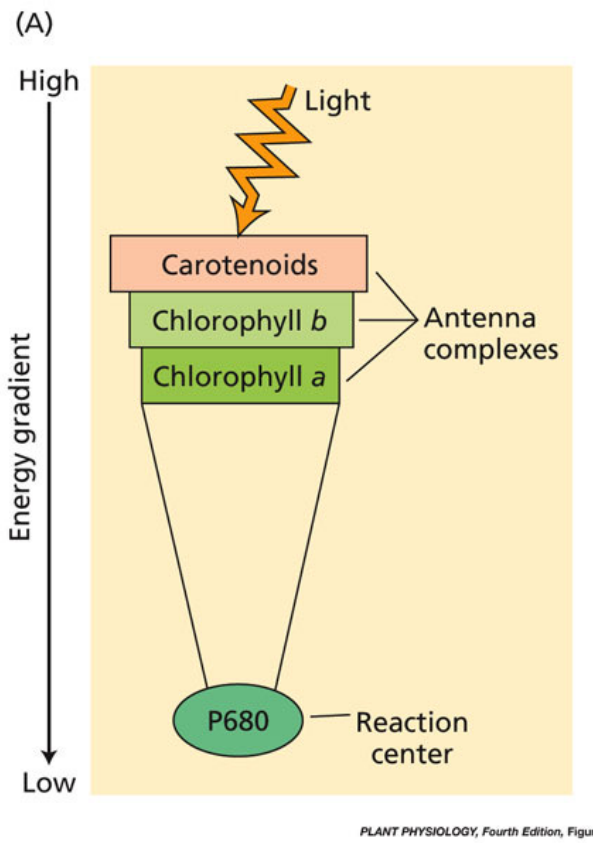
Der Excitonentransfer

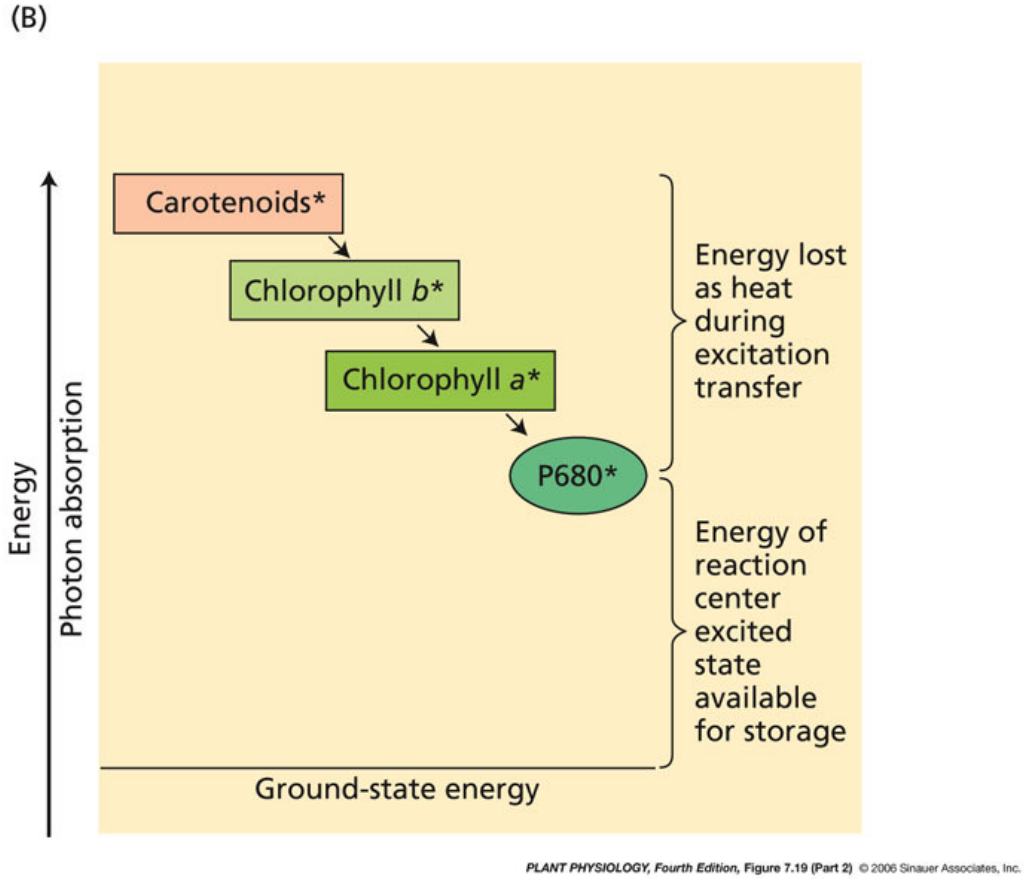


Pigmente: **Chlorophylle plus „akzessorische Pigmente“**

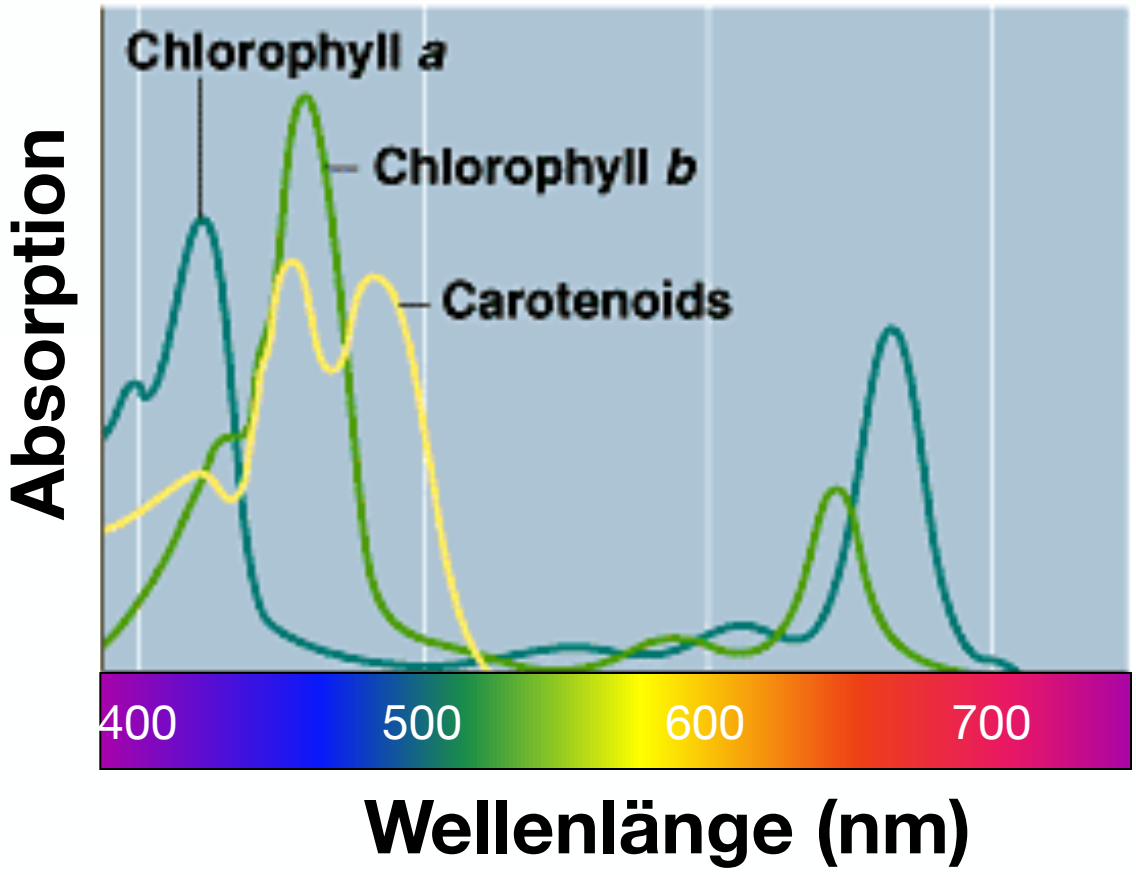
Carotinoide

Direktionalität des Excitonentransfers





Absorptionsspektren der Pigmente



Der finale Akzeptor **KANN** nur ein **Chlorophyll A** sein!!!

Die Anregung eines Pigments

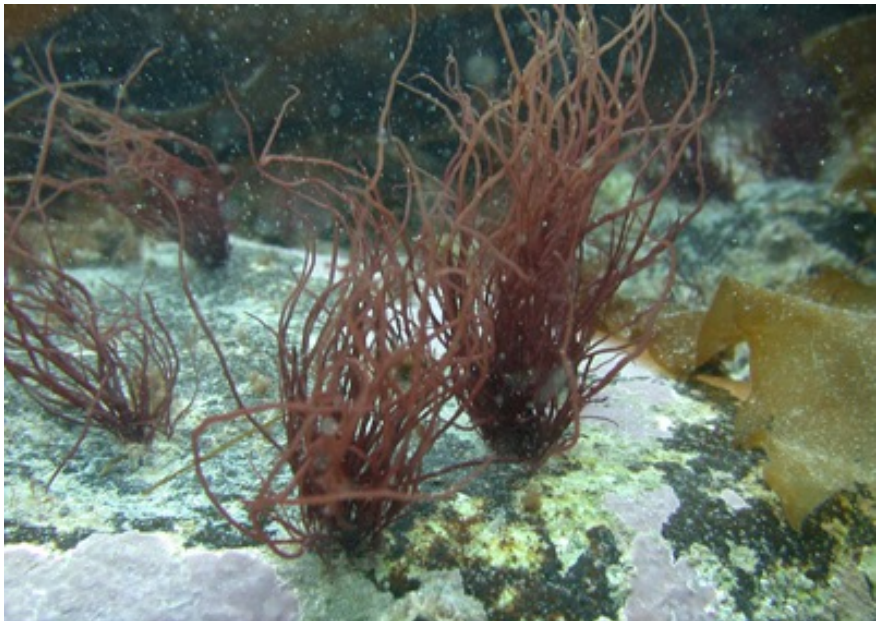
- **Für die Anregung eines Pigments wird ein Elektron (e^-) auf ein angeregtes (energiereicheres) Orbital angehoben.**

- **Nach den Gesetzen der Quantenmechanik erfolgt dies nur, wenn die Energie des eingestrahlten Lichtes exakt mit der Energie-differenz des e^- auf dem Ausgangsorbital E_a und auf dem angeregten Orbital E_{ex} übereinstimmt. D.h. wenn:**

$$E_{ex} - E_a = h\,{}^{c}/_{\lambda}$$

- **Dies bedeutet, dass ein photosynthetisch aktiver Organismus seine lichtabsorbierenden Pigmente exakt auf die Qualität des einfallenden Lichtes in seinem Lebensraum optimieren muss !**

Rotalgen



Antennen der Rot- und Blaualgen

Rot- und **Blaualgen** leben in tieferen Wasserschichten, in die das Rotlicht, das von den Antennenkomplexen der **Grünalgen** und **Höheren Pflanzen** absorbiert wird, nicht vordringt

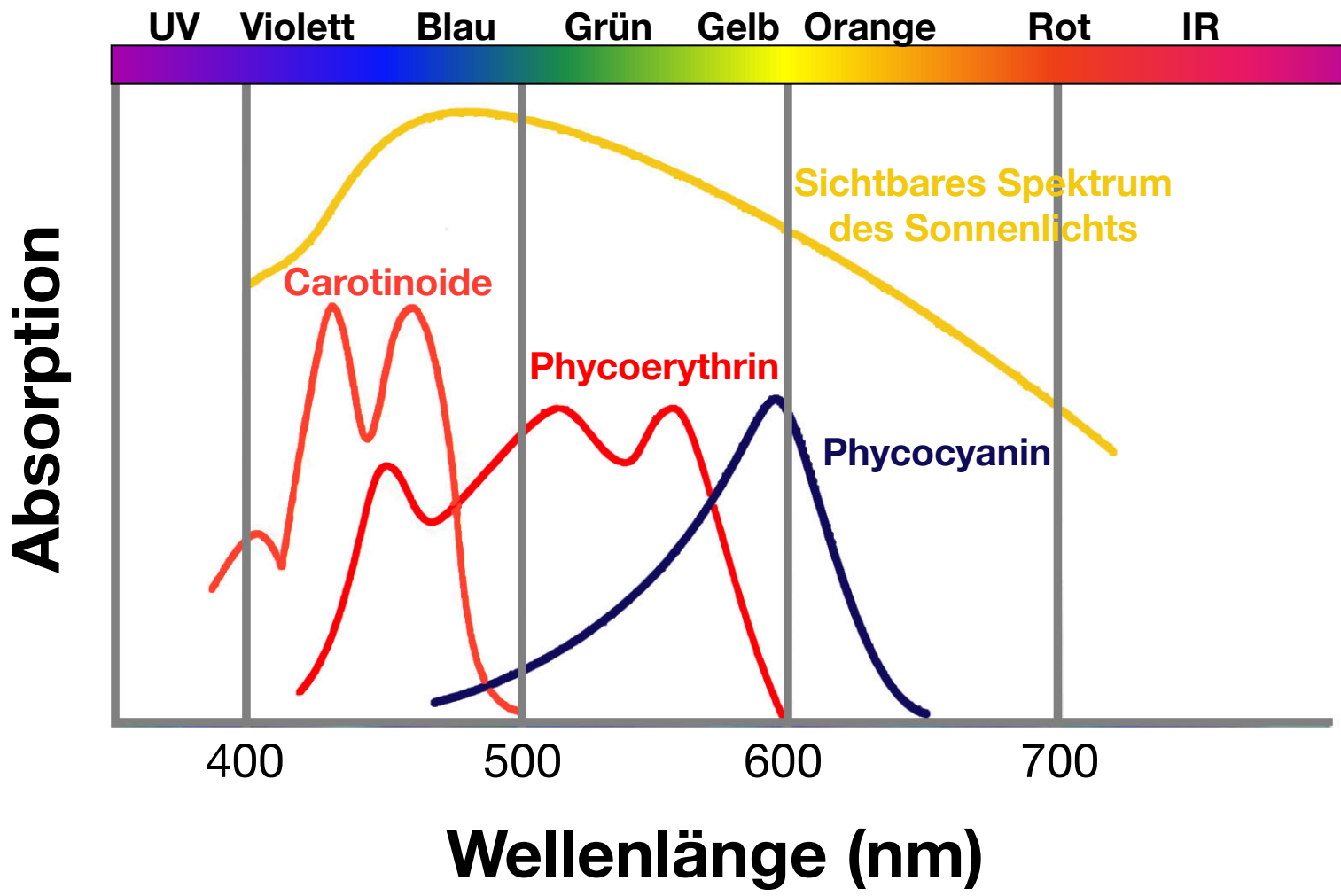
Sie benötigen Antennenkomplexe, die an diese veränderten Lichtverhältnisse angepasst sind !!!

Mehrere dimere Proteine (a und b Untereinheit) tragen jeweils eines der folgenden Pigmente (**PHYCOBILINE**):

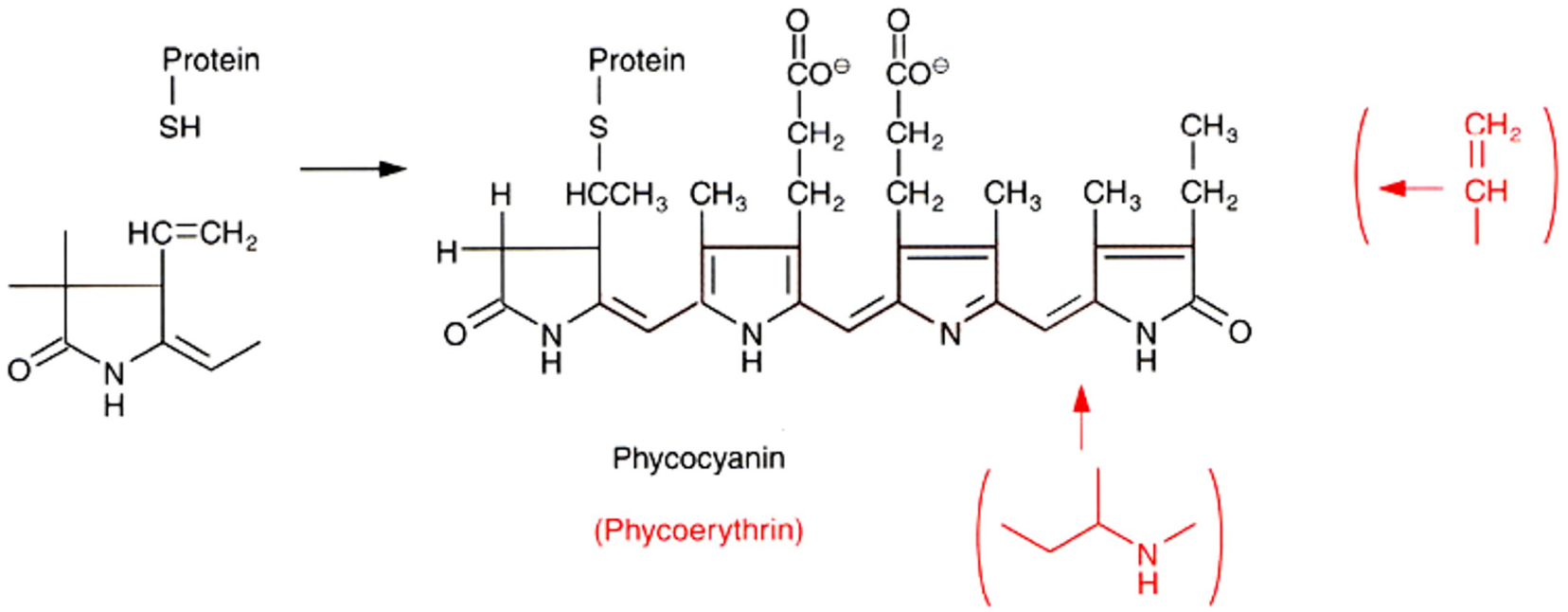
Phycoerythrin - Phycocyanin - Allophycocyanin

Diese Antennen formen wasserlösliche Partikel (PHYCOBILISOMEN) und sitzen in der Nähe des Reaktionszentrums von PSII an der Thylakoidmembran

Absorptionsspektren der Phycobiline

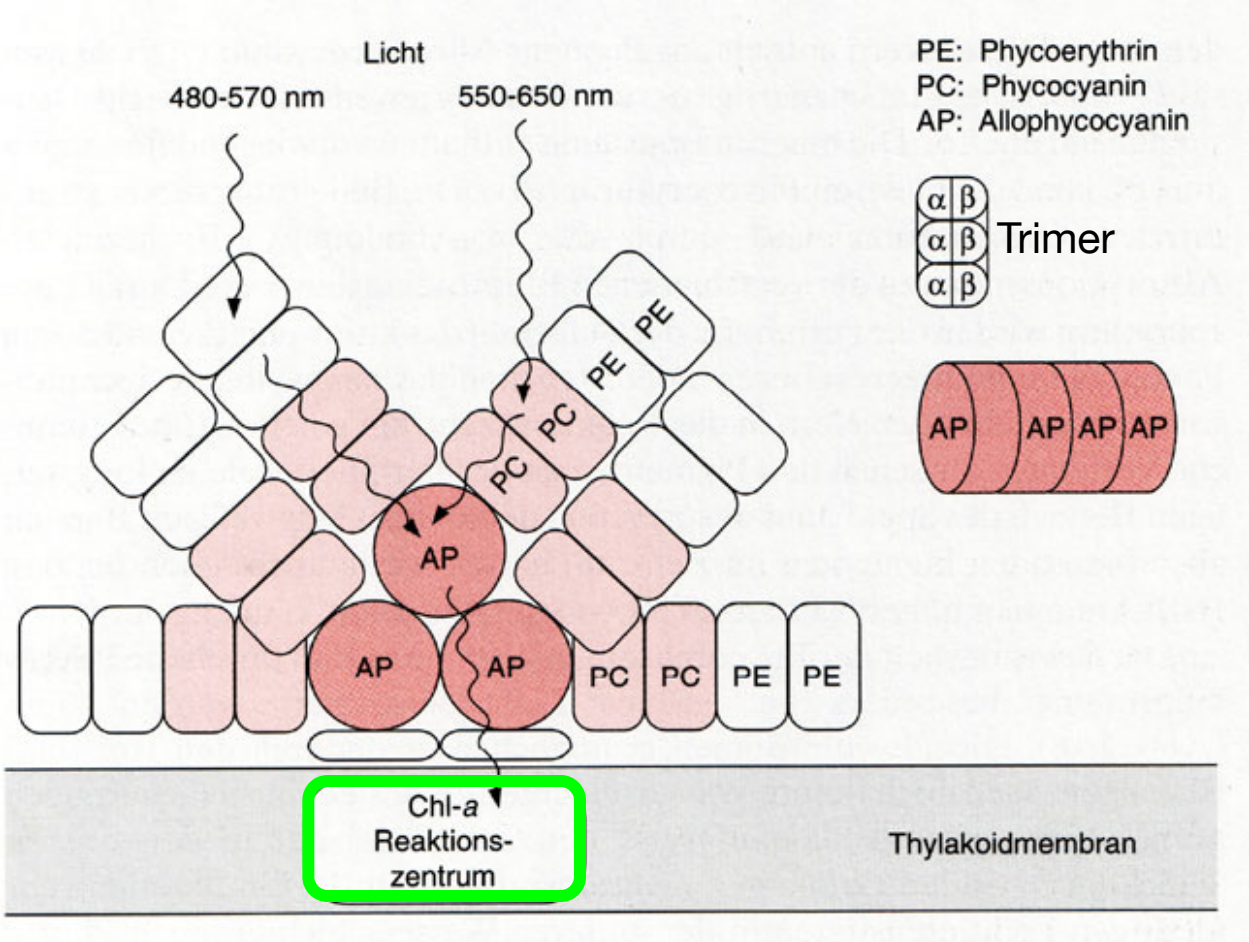


Chromophore der Phycobiline



Offenkettige Tetrapyrrole

Das Phycobilisom



Lichtabsorption:

Phycoerythrin (PE)
480 - 570 nm

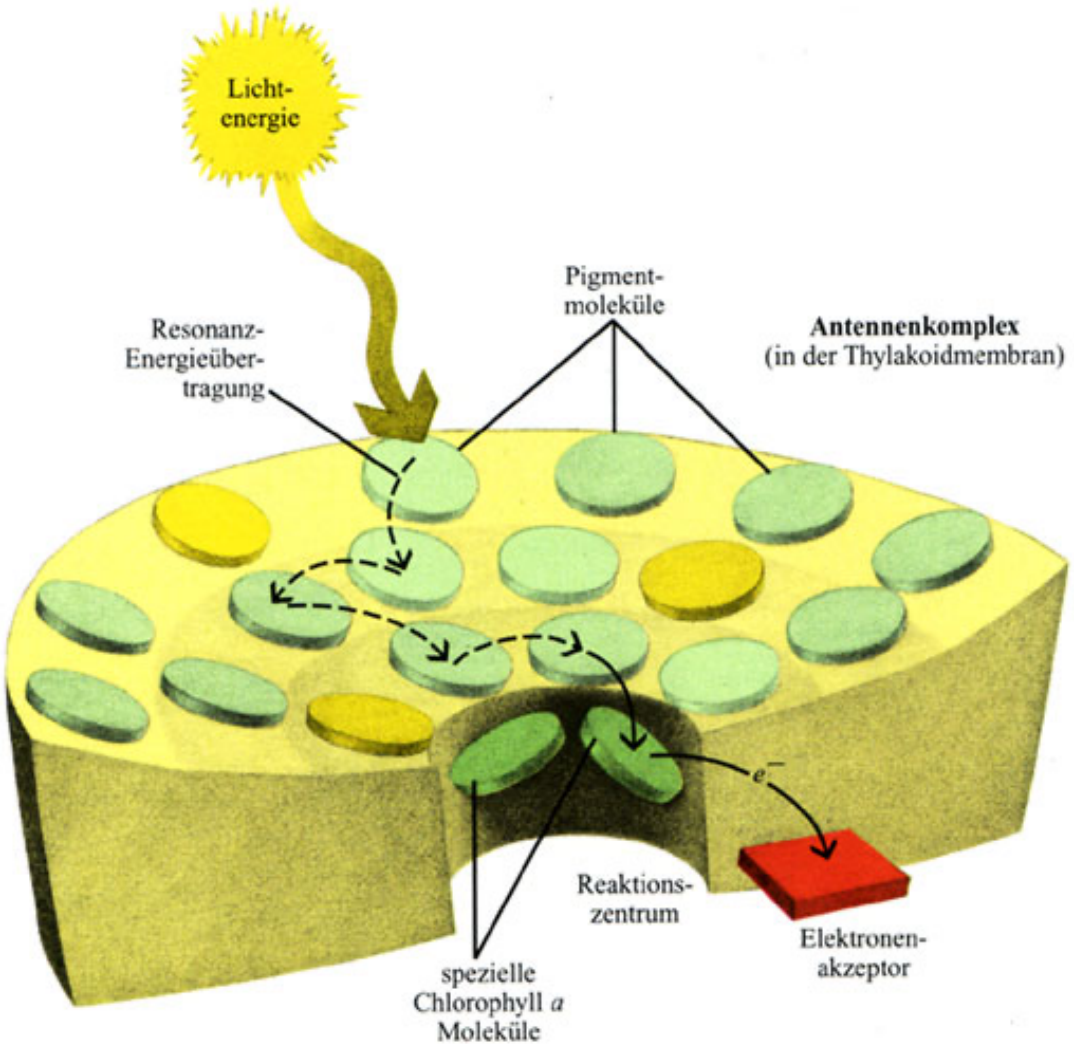
Phycocyanin (PC)
550 - 650 nm

Allophycocyanin (AP)
650 - 670 nm

P680

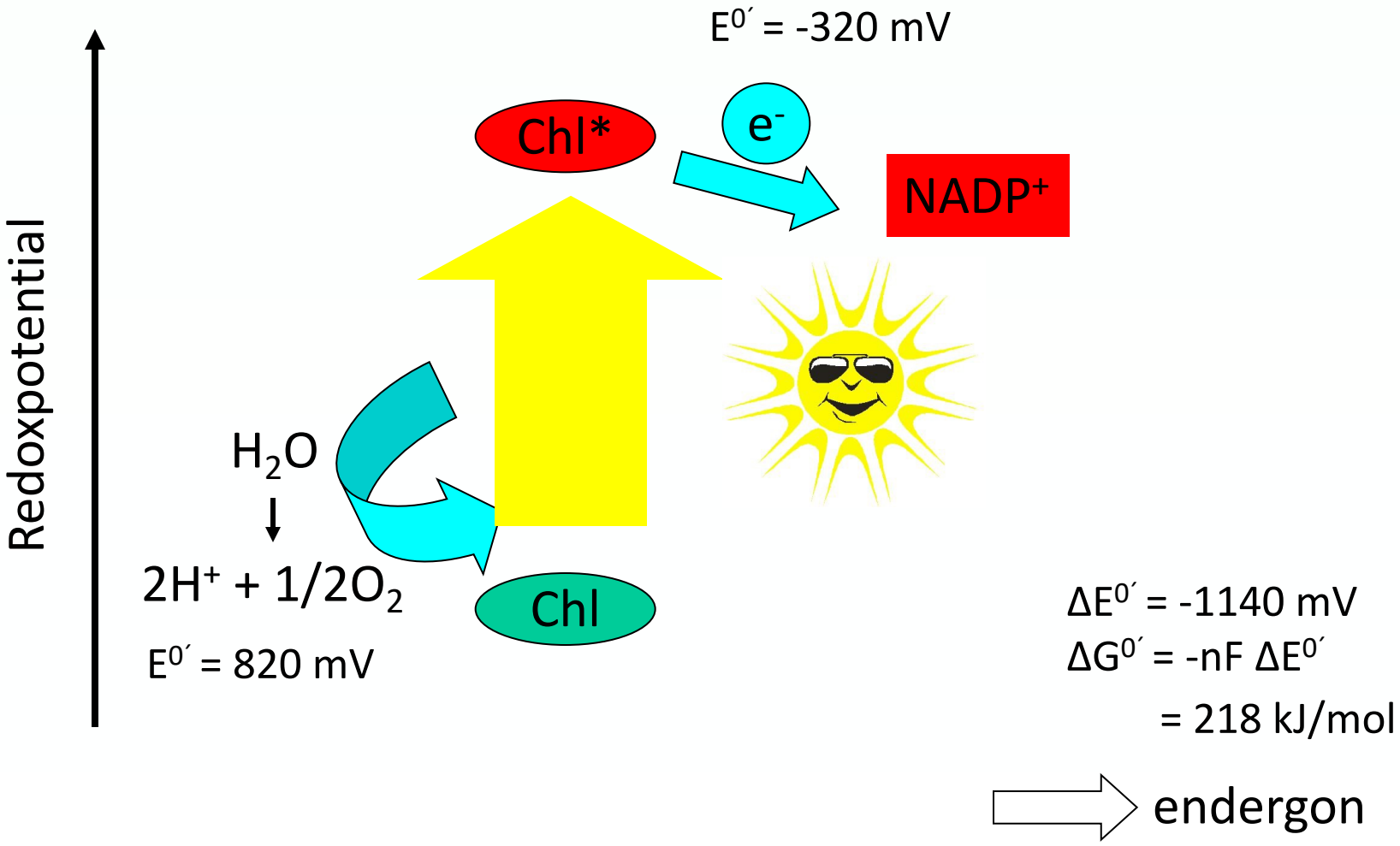
Phycoerythrin → Phycocyanin → Allophycocyanin → Chlorophyll *a*

Modell des Antennenkomplexes



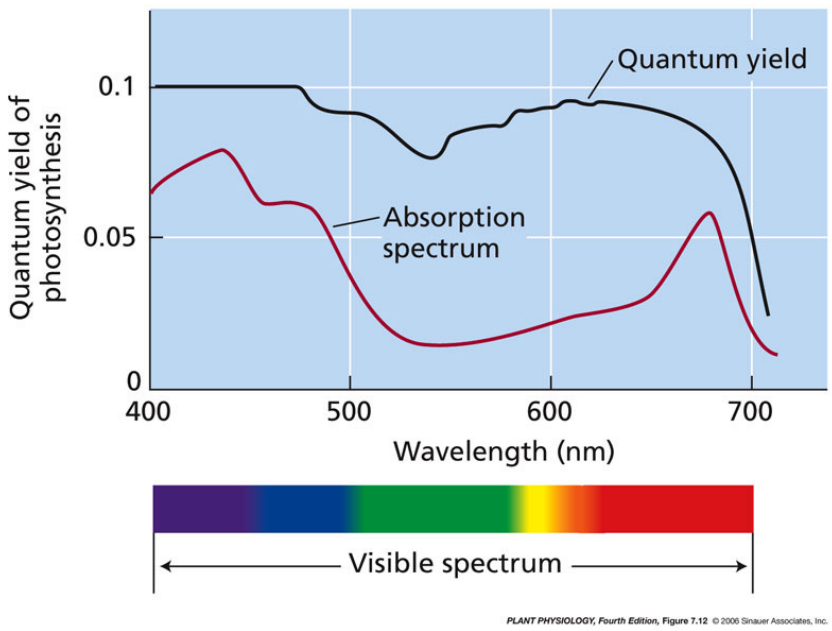
An einem einzigen Antennenkomplex sind etwa 300 Chlorophyll - Moleküle beteiligt, die die eingefangene Lichtenergie auf das gepaarte „special pair“ von Chlorophyllen im Reaktionszentrum übertragen

Photosynthese, ein Redoxvorgang

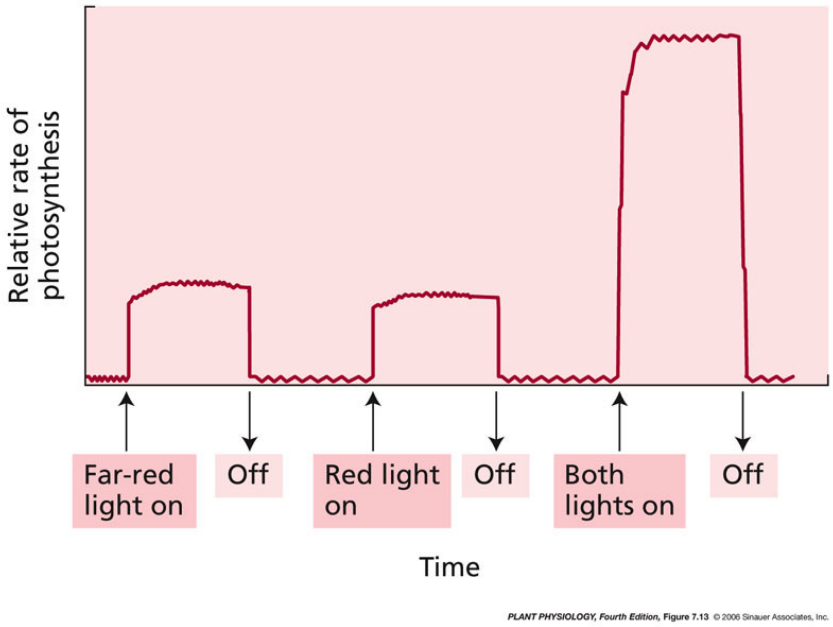


Zwei Photosysteme - Woher wissen wir das???

Der „red-drop“ Effekt

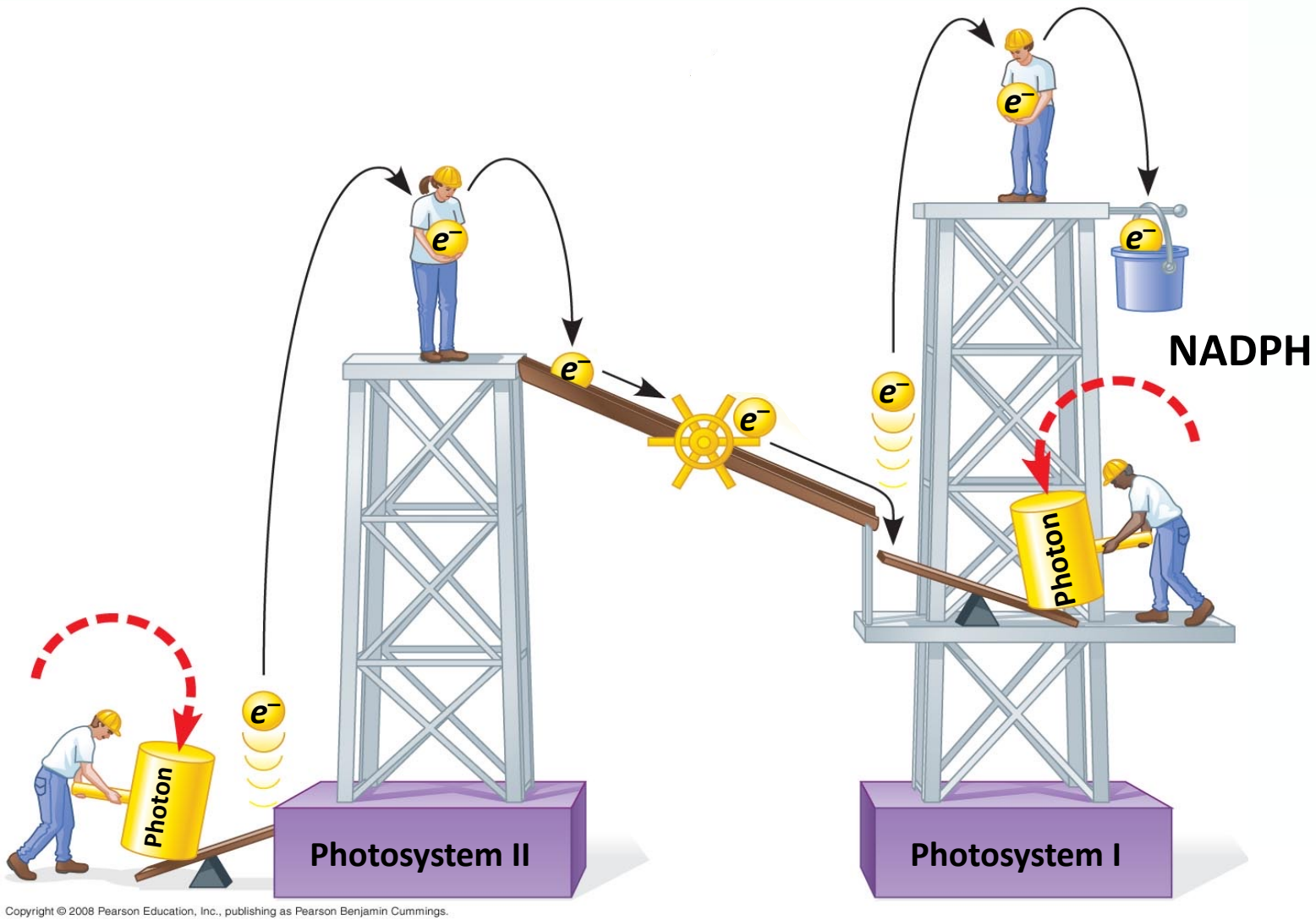


Der Emerson-Effekt

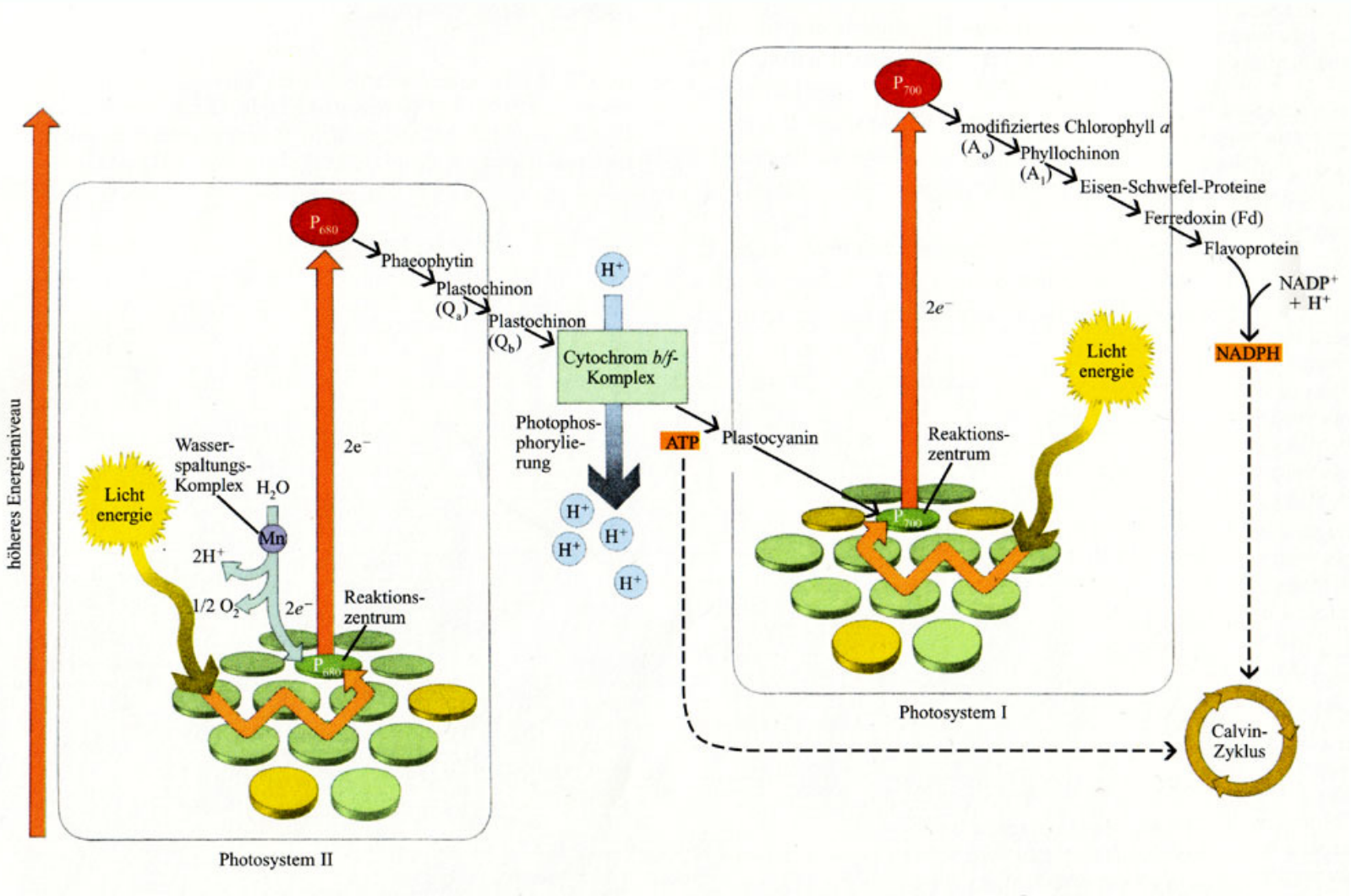


Quantenausbeute: Mol O_2 produziert pro Mol Quanten absorbiert

Die Überbrückung des ΔE_0‘ erfordert zweimal Energie!



Jedes Photosystem besitzt eine Antenne

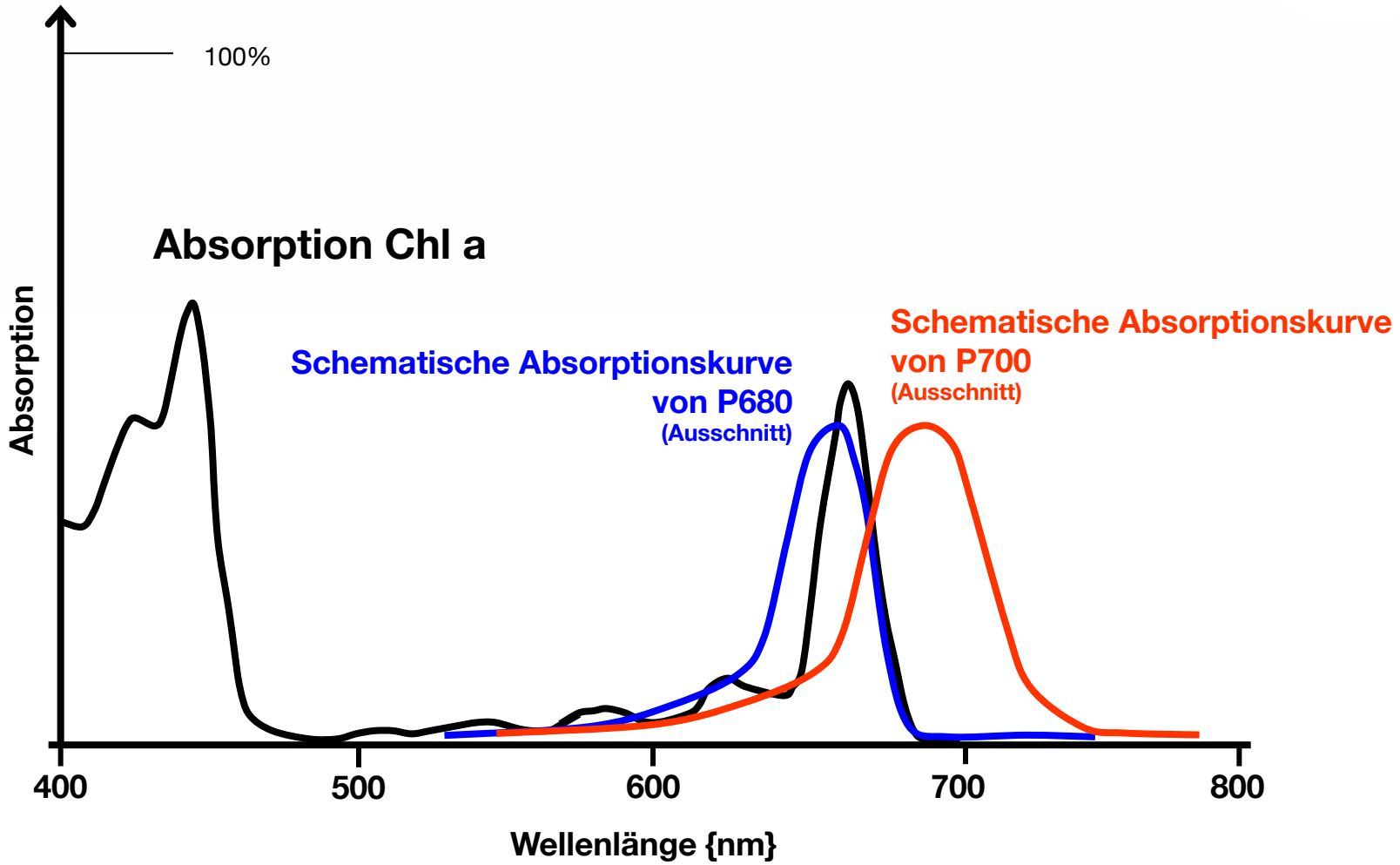


P 680 P 700

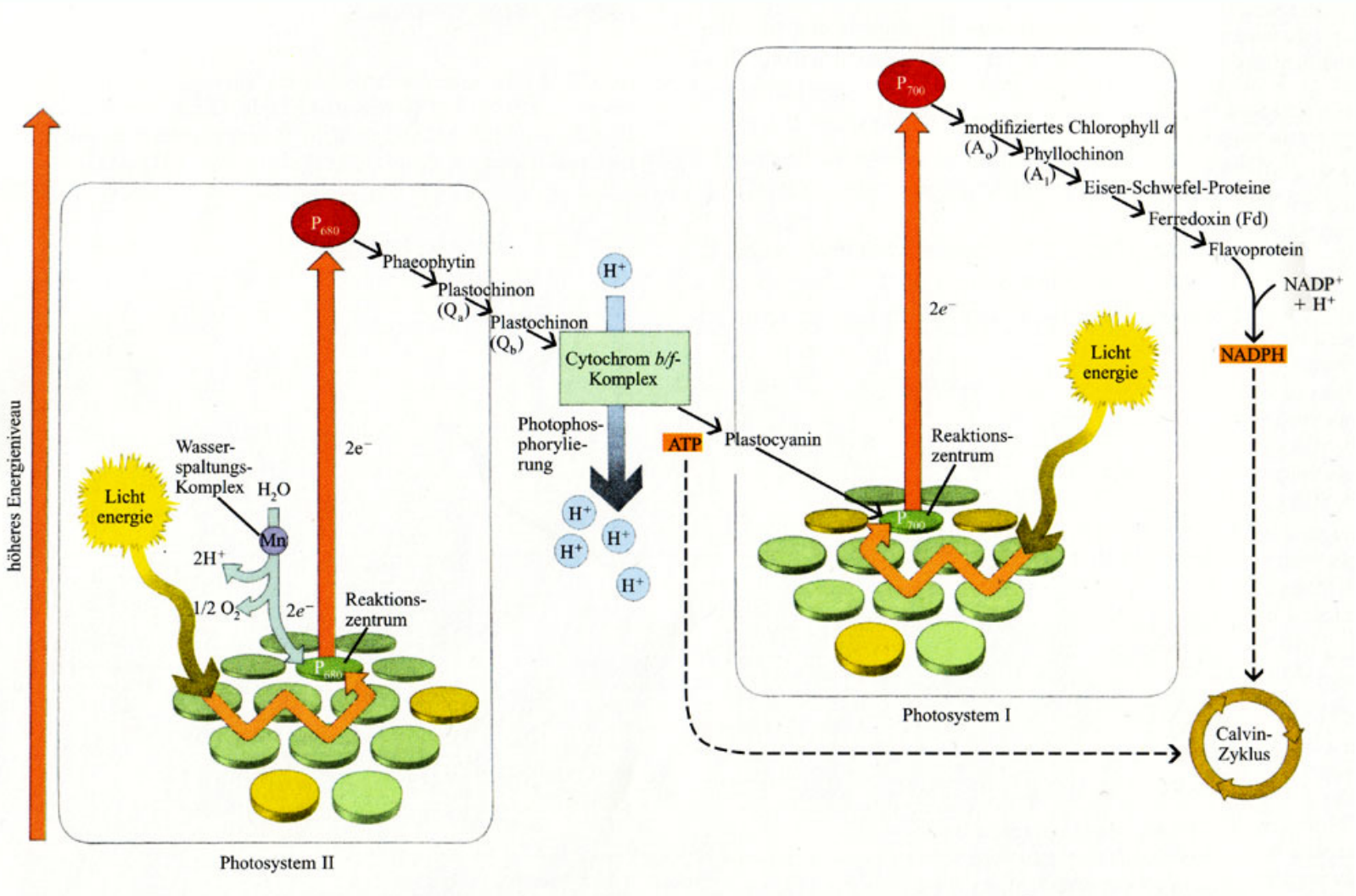
Die Photosysteme

- **Grünalgen und Pflanzen besitzen zwei Photosysteme, in denen die Ladungstrennung erfolgt: PSI und PSII.**
- **Im PSI besitzt das Chlorophyll ein Absorptionsmaximum bei 700 nm (P700)**
- **Im PSII besitzt das Chlorophyll ein Absorptionsmaximum bei 680 nm (P680)**
- **Sie enthalten je ein Reaktionszentrum, das aus einem Chlorophyll a - Dimer gebildet wird („special pair“)**

Abhängigkeit der Chl-Absorption von der Proteinumgebung

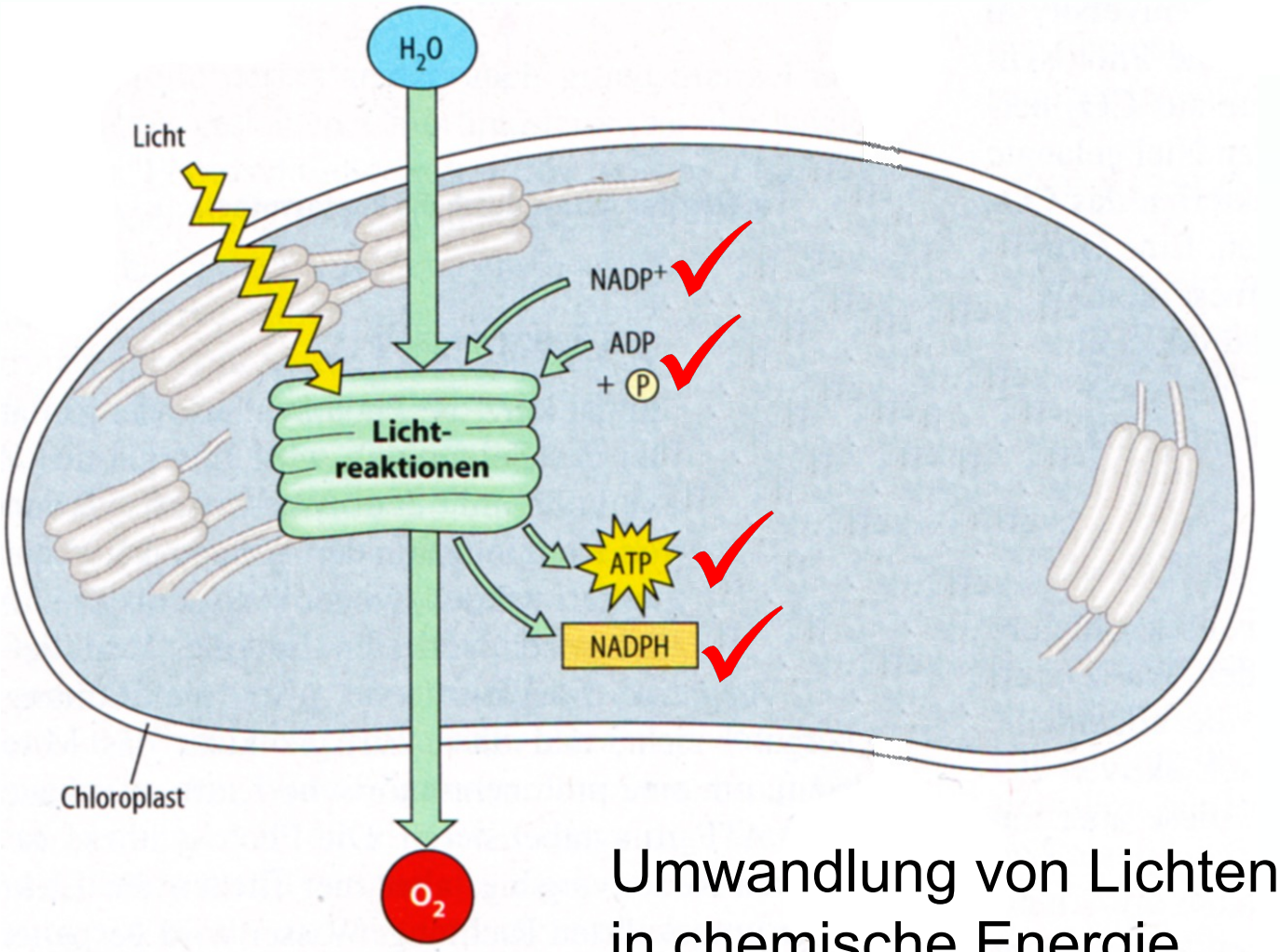


Jedes Photosystem besitzt eine Antenne



P 680 P 700

Produkte der Lichtreaktion



Umwandlung von Lichtenergie in chemische Energie